



**Universidad
Carlos III de Madrid**

**DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL
Y LAS COMUNICACIONES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE ANTENAS DIRECTIVAS EN
TECNOLOGÍA TEXTIL DE TIPO FABRY-PEROT**

AUTOR: AITOR VICO MARTÍNEZ

TUTOR: Dra. EVA RAJO IGLESIAS

11/03/2014

TÍTULO: DISEÑO DE ANTENAS DIRECTIVAS EN TECNOLOGÍA TEXTIL DE TIPO
FABRY-PEROT

AUTOR: *Aitor Vico Martínez*

TUTOR: *Dra. Eva Rajo Iglesias*

La defensa del presente Trabajo Fin de Grado se realizó el 11 de Marzo de 2014;
siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE: Matilde Pilar Sánchez Fernández.

SECRETARIO: Manuel Alberto Vázquez López.

VOCAL: Marta Portela García.

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Presidente

Secretario

Vocal

Agradecimientos:

No quería terminar esta etapa de mi vida sin agradecer por tanto y a tantos todo lo que he podido aprender.

En primer lugar, muchas gracias a mis padres y mi hermano. Ellos más que nadie saben lo que he sufrido para llegar hasta aquí, y sin su apoyo y ayuda esto no hubiese sido posible. Muchas gracias por la confianza depositada en mí siempre. Y por supuesto a mi abuela.

Dar las gracias a todas las personas que he ido conociendo en mis años de universidad, y que de una u otra manera han ayudado a que sea quien soy hoy. Gracias a Pakito, Jorge, Espi, Sergio, Gorgas, Javi, Javinho, Oli, Fran, Pichichi, Suso... con los que he compartido estos últimos años de universidad, y los que han hecho mucho más llevadera mi estancia universitaria. Seguro que se me olvida alguno, pero en general gracias a todos los que han compartido conmigo algún momento bueno dentro de las cuatro paredes imaginarias de la universidad.

Dar las gracias a mi tutora Eva, por haberme ayudado en todo lo posible y haber tenido la suficiente paciencia conmigo en todo momento. Muchas gracias a Darwin también por haberme ayudado en todo lo que haya podido.

Por supuesto, dar las gracias a los colegas de siempre, a esos que siempre preguntan y siempre han estado ahí cuando lo he necesitado.

A TODOS, ¡¡MUCHAS GRACIAS!!

Tabla de contenidos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 MOTIVACIÓN	8
1.2 OBJETIVOS	9
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	11
1.4 INTRODUCCIÓN A LAS ANTENAS TEXTILES	11
CAPÍTULO 2. TEORÍA DE ANTENAS DE PARCHE	15
2.1 CARACTERÍSTICAS	15
2.2 TIPOS DE ONDAS EN LÍNEAS MICROSTRIP	17
2.3 MÉTODOS TÍPICOS DE ALIMENTACIÓN DE ANTENAS DE PARCHE	19
2.3.1. ALIMENTACIÓN DIRECTA	19
2.3.2 ALIMENTACIÓN POR PROXIMIDAD	20
2.3.3 ALIMENTACIÓN POR APERTURA	21
2.4 DISEÑOS DE ANTENAS DE PARCHE	22
2.4.1 DISEÑO 1: PARCHE CUADRADO	23
2.4.2 DISEÑO 2: DISEÑO CUADRADO CON GAP	26
2.4.3 DISEÑO 3: DISEÑO CIRCULAR	30
2.5 COMPARATIVA	33
CAPÍTULO 3. DISEÑO ANTENAS FABRY-PEROT	35
3.1 DISEÑOS PREVIOS	36
3.1.1 DISEÑO CON UNA SOLA LÁMINA TEXTIL	37
3.1.2 DISEÑO CON DOS LÁMINAS TEXTILES	39
3.2 DISEÑOS FABRY-PEROT	41
CAPÍTULO 4. ESTUDIO DEL EFECTO DE CURVATURA EN ANTENAS FABRY-PEROT	48
CAPÍTULO 5. DISEÑO ANTENA FINAL	54
CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES	63
6.1 MONTAJE DEL PROTOTIPO Y MEDIDAS EN EL LABORATORIO	67
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	70
7.1 CONCLUSIONES	70
7.2 LÍNEAS FUTURAS	72
CAPÍTULO 8. PRESUPUESTO	73
REFERENCIAS	75

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

Este Trabajo de Fin de Grado surge debido al gran crecimiento que están experimentando ciertas tecnologías (como pueden ser WiFi o HIPERLAN) que operan en la banda ISM a 5.8GHz, y la posibilidad de realizar antenas con diseños textiles que cumplen las especificaciones necesarias.

Las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) son las bandas de radio reservadas con carácter internacional para fines industriales, médicos y científicos. Las fuertes emisiones que realizan los dispositivos que suelen operar en esta banda pueden crear interferencias electromagnéticas, e interrumpir las comunicaciones por radio que operan a la misma frecuencia, por lo que estos dispositivos están limitados a ciertas bandas. En general, los usuarios no deben someterse a ninguna protección a usar aparatos que funcionen en esta banda de frecuencia, y además las radiaciones no son nocivas para la salud humana.

A pesar de la asignación original que se dio a esta banda, y debido a que hay varias asignaciones, en los últimos años se ha extendido el uso de estas bandas para sistemas de telecomunicaciones de corto alcance y baja potencia emitida, como pueden ser los teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth y las redes inalámbricas domésticas.

Hay varias asignaciones de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) a bandas de frecuencia para aplicaciones ISM, pero las más usadas junto a sus características se muestran a continuación: [\[REF-ELÉC.1\]](#)

Frec. inicial	Frec. Final	Ancho de banda	Frec. central	Disponibilidad
902 MHz	928 MHz	26 MHz	915 MHz	Europea
2.4 GHz	2.5 GHz	100 MHz	2.45 GHz	Mundial
5.725 GHz	5.875 GHz	150 MHz	5.8 GHz	Mundial
24 GHz	24.25 GHz	250 MHz	24.125 GHz	Mundial

Inicialmente estas bandas fueron ideadas para los llamados usos ISM, pero finalmente se le han ido añadiendo funcionalidades para otras aplicaciones, por lo que podemos distinguir los usos ISM de esta banda de los usos no ISM de la misma.

- **Usos ISM**

Para muchas personas el dispositivo ISM más usual es el microondas que tenemos en casa, que funciona a 2.45GHz. Sin embargo, existen muchos otros dispositivos que usan estas bandas y están fuera de una vivienda. Muchas instalaciones industriales pueden utilizar dispositivos ISM en los procesos de soldadura de plástico, en los centros médicos la mayoría de dispositivos de onda corta y microondas son ISM, cuyo uso principal es la relajación muscular. Dentro del sector médico, incluso hay una aplicación ISM que trata tumores mediante el calentamiento por RF.

También algunos diseño de lámparas sin electrodos son aparatos ISM, que utilizan las emisiones de radiofrecuencia para excitar los tubos fluorescentes. Algo parecido ocurre con las lámparas de azufre, que utilizan un magnetrón a 2.5GHz para calentar el azufre en un plasma brillante. Incluso la NASA ha estudiado el uso de la transmisión de energía de microondas a 2.45GHz, para enviar la energía solar recogida por los satélites diseñados para ello de vuelta a la tierra.

- **Usos no ISM**

En los últimos años las bandas ISM también se han empezado a usar en otras aplicaciones de comunicaciones, como en redes inalámbricas de sensores en las bandas de 915 MHz y 2.45 GHz, así como en las LAN inalámbricas y en los teléfonos inalámbricos domésticos, que funcionan en las banda de 915MHz, 2.45 GHz y 5.8 GHz. Debido a que estas aplicaciones realizan emisiones de muy poca potencia, no crean interferencias con las emisiones ISM en estas bandas.

Los dispositivos de área local inalámbricos usan las siguientes bandas de frecuencia:

- Bluetooth: 2.45 GHz.
- HIPERLAN: 5.8 GHz.
- IEEE 802.11/WiFi: 2.45 y 5.8 GHz.
- IEEE 802.15.4, ZigBee y las otras redes de área personal (PAN) pueden usar la banda tanto de 915 MHz como la de 2.45GHz, debido a que usan un sistema de compartición de frecuencias entre las distintas asignaciones.

1.2 Objetivos

En la actualidad los cuerpos de seguridad y servicios del estado como pueden ser los bomberos, policías o ambulancias utilizan para comunicarse entre sí circuitos cerrados

de radiotelefonía, que hacen obligatorio un dispositivo extra para realizar dicha comunicación.

Con el auge de la tecnología microstrip en los sistemas de telecomunicaciones debido a que se integran con facilidad con otros componentes, y son antenas de bajo coste, se estudiará la posibilidad de realizar una antena de parche con componentes textiles que radie a la frecuencia ISM de 5.8 GHz, y que sea lo suficientemente grande para poder fabricarse sin demasiadas dificultades y lo suficientemente pequeña que se pueda integrar en la ropa.

Para ello, contamos en el laboratorio con un componente textil, el fieltro, con una permitividad eléctrica ya medida previamente ($\epsilon_r = 1.22$) y unas planchas de caucho comercial de un espesor de 3 milímetros y cuya permitividad se midió durante el desarrollo de este trabajo ($\epsilon_r = 5.85$) para una frecuencia de operación de 5.8 GHz.

En general, las antenas textiles que existen en la literatura son de tipo parche, y por tanto, con baja directividad. En este trabajo se propone evaluar la viabilidad de realizar antenas textiles directivas, basándose en el concepto de antena Fabry-Perot alimentadas por parches. La antena estará compuesta por los dos materiales mencionados y algún sustrato de permitividad mayor, trabajando en la banda de los 5.8 GHz y tratando que sea lo más directiva posible.

En conclusión, se busca hacer una antena textil sencilla pero directiva y además ha de tener un bajo perfil para que haya posibilidad de integración con la ropa.

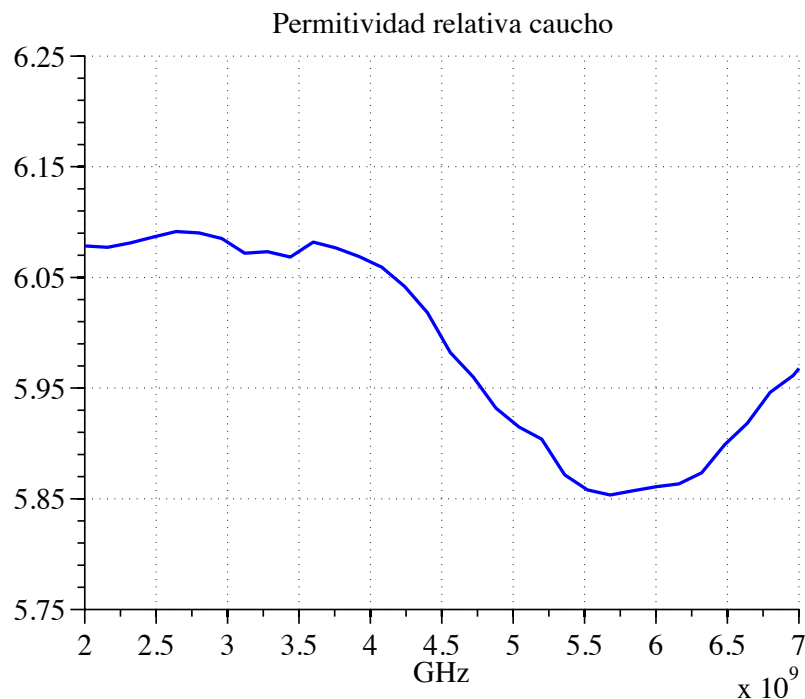


Figura 1.1: Medida permitividad relativa del caucho en el laboratorio

1.3 Organización de la memoria

En este apartado se describirá brevemente la estructura y los contenidos que se van a tratar a lo largo de este trabajo de fin de grado.

En primer lugar, encontramos un capítulo introductorio en el cual se describen los motivos de la realización de este trabajo, así como una breve introducción a las aplicaciones que suelen usarse en la banda de frecuencia estudiada, la banda ISM. Para concluir esta introducción, se realiza una breve presentación de las antenas textiles.

A continuación, los dos siguientes capítulos describen la teoría tanto de las antenas de parche como un tipo concreto de antenas, las Fabry-Perot. Para ilustrar la teoría, se irán usando ejemplos simulados con un software específico para ello .

En el cuarto capítulo veremos cómo afecta la curvatura a una antena Fabry-Perot, para así poder conocer sus efectos sobre el comportamiento de la misma.

Posteriormente se presenta el diseño final realizado y los problemas que éste ha ocasionado, llegando a cambiar el diseño por motivos de tamaño, y de disponibilidad de material en el laboratorio, ya que los resultados con la antena diseñada inicialmente necesitaba un tamaño de parche muy poco funcional para las necesidades que se presentan.

En el sexto capítulo se incluyen las medidas y las distintas especificaciones que cumplirá el diseño experimental. Además podremos ver los resultados del laboratorio.

Para terminar se resumen las conclusiones que se han derivado tras la realización de todo el trabajo y las posibles líneas futuras de investigación y mejoras.

1.4 Introducción a las antenas textiles

Una antena textil es una antena que se realiza con materiales/derivados textiles convencionales o industriales, donde normalmente las partes conductoras de la antena están hechas con fibras conductoras modernas. La aparición de este tipo de antenas responde a varios factores que han ido consolidando esta tecnología capaz de adaptarse a las distintas necesidades de los usuarios de las nuevas redes de comunicaciones. Entre estos factores se encuentran el desarrollo de los distintos tipos de redes inalámbricas, evolucionando de las redes PAN (Personal Area Networks) hacia las nuevas redes llamadas WBAN (Wireless Body Area Networks).

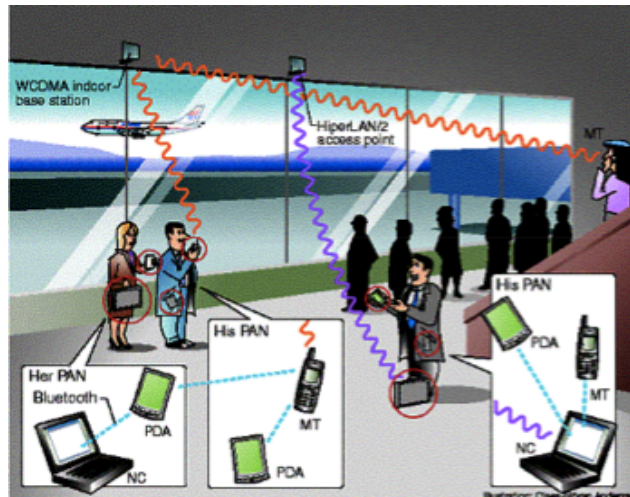


Figura 1.2: Personal Area Network (PAN)

Las llamadas redes de área corporal (BAN) se están convirtiendo en una parte importante del sistemas de comunicaciones móviles. El creciente uso de las redes inalámbricas y la miniaturización de los dispositivos han potenciado el desarrollo de las WBAN. Esta red se puede utilizar por ejemplo para monitorizar continuamente la salud de un paciente, con actualizaciones en tiempo real a través de internet de los registros de las bases de datos utilizadas por los médicos. Además pueden integrar sensores fisiológicos para la detección de condiciones médicas en cuerpos humanos de corta edad. Las llamadas comunicaciones inalámbricas Body-Centric (BCWC) están al alza debido a la gran cantidad de aplicaciones en diferentes áreas como pueden ser la monitorización de dispositivos de salud, uso militar, de seguridad, de atención domiciliaria, etc. [\[REF.1\]](#)

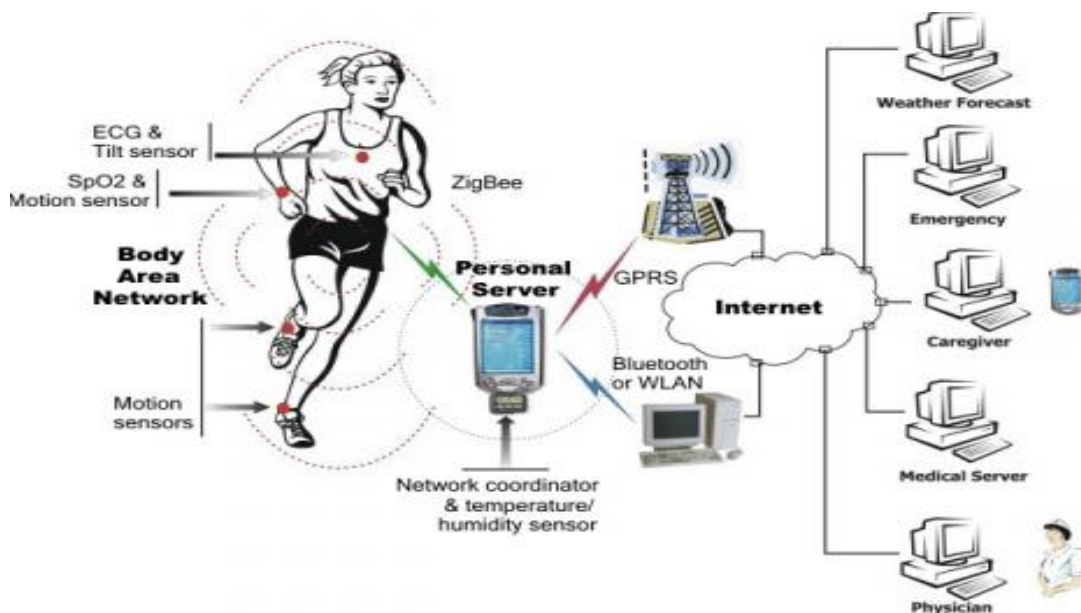


Figura 1.3: Body Area Network (BAN)

Además de la aparición de estas redes, también han ido surgiendo una serie de distintos protocolos inalámbricos que han inspirado el desarrollo de antenas de tipo textil como pueden ser Bluetooth, WiFi o WiMax, debido a su alto uso en las nuevas tecnologías de aplicaciones inalámbricas, tanto para comunicaciones como para datos. El auge de estas tecnologías hace necesario idear unos sistemas ligeros, flexibles y de fácil integración con el cuerpo humano que permitan una movilidad completa.

La utilización de materiales textiles para la fabricación de antenas de tipo microstrip ha crecido muy rápidamente en los últimos años debido a la miniaturización de los dispositivos inalámbricos, tendiendo cada vez a dispositivos más pequeños y manejables.

A continuación se nombran algunas de las características más importantes de las antenas textiles:

- Principalmente usadas en estructuras planas.
- Flexibilidad.
- Optimizadas para funcionar en estrecha proximidad con distintas superficies, como puede ser el cuerpo humano.
- Optimizadas para soportar exigentes entornos climáticos.
- Su funcionamiento eléctrico es igual que el de una antena convencional.

Las antenas textiles pueden ser integradas en la ropa de una manera sencilla, lo que las hace útiles para la integración en aplicaciones militares y de seguridad (como ya se ha dicho anteriormente), o embebidas en los uniformes de una flota (como puede ser el cuerpo de bomberos o de policía).

Por último, destacar algunas de las ventajas de este tipo de antenas como pueden ser: peso ligero, lo que las hace muy fácil de integrar en cualquier sistema de comunicaciones, requieren un bajo mantenimiento, no hay que realizar ningún tipo de configuración, son robustas, imperceptibles (esto cobra especial importancia en el ámbito militar), son flexibles y de fácil integración en la ropa. [\[REF-ELÉC.2\]](#) [\[REF.2, 4\]](#)



Figura 1.4: Antena rectangular textil



Figura 1.5: Prototipo circular textil

Capítulo 2. Teoría de antenas de parche

2.1 Características

En situaciones en las que el tamaño, el peso, el rendimiento, el coste o la facilidad de instalación son claves como pueden ser en los aviones de alto rendimiento, vehículos espaciales o satélites, pueden ser necesarias antenas con un bajo perfil. Para cumplir todos estos requisitos se pueden utilizar las antenas microstrip.

Estas antenas son de perfil bajo, adaptables a superficies planas y no planas, con un diseño simple y baratas de fabricar usando la tecnología impresa. También son mecánicamente robustas cuando se montan en superficies rígidas, compatibles con diseños MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits), muy versátiles en cuanto a la frecuencia de trabajo y la polarización. Este tipo de antenas ofrece una tendencia a su uso para monitorización al lograr dispositivos cada vez más pequeños y con componentes más ligeros, son de fácil producción en masa ya que sus costes no son muy elevados y son fáciles de adaptar con circuitos integrados de microondas.

Las principales desventajas operativas de las antenas de parche son su alta Q , pobre pureza de polarización, radiación espuria, anchos de banda muy bajos, los cuales suelen ser una fracción de un tanto por ciento. En algunas aplicaciones las limitaciones del ancho de banda no son un problema, ya que no hay una gran cantidad de datos a enviar. Sin embargo, hay algunos métodos que nos permiten mejorar en la medida de lo posible el ancho de banda disponible, como pueden ser aumentar la altura del sustrato. Este método, además del aumento ancho de banda (hasta un 35%) también te permite aumentar la eficiencia de la antena (hasta casi un 90%), pero al aumentar la altura pueden aparecer las ondas de superficie que consumen energía del total disponible de la radiación, y hacen empeorar el rendimiento.

Estas ondas de superficie no son deseables en nuestros diseños, y pueden ser eliminadas mediante el uso de cavidades.

Una antena microstrip consiste en una tira metálica muy fina ($t \ll \lambda_0$, donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío a la frecuencia de operación correspondiente) y un plano de masa entre los que se coloca una lámina dieléctrica (llamada normalmente sustrato). El parche microstrip puede ser diseñado para tener su máximo de radiación en la dirección normal al parche (broadside), eligiendo el modo de excitación correcto. También es

posible configurar una antena de parche para que tenga su máximo de radiación apuntando a 0° (End-fire).

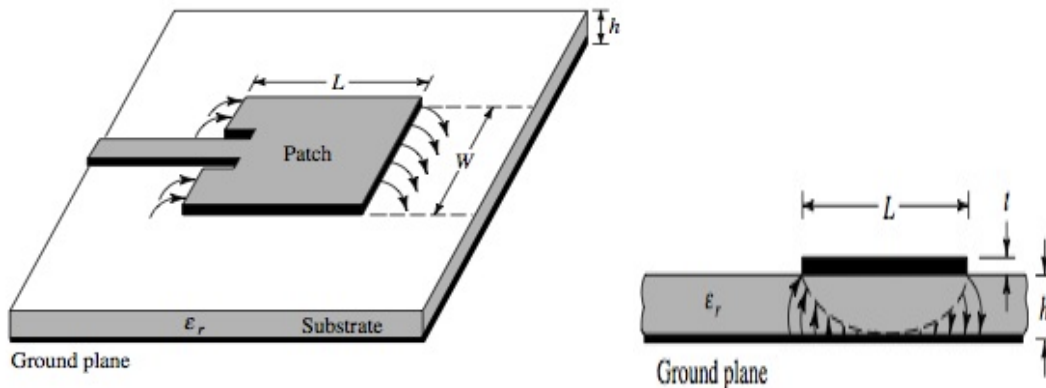


Figura 2.1: Antena Microstrip

Se pueden utilizar numerosos sustratos para el diseño de antenas microstrip, y típicamente se suelen usar diseño con permitividades comprendidas entre $1.2 \leq \epsilon \leq 12$. Los sustratos que mejor comportamiento presentan en estas antenas son aquellos cuya constante dieléctrica sea lo más pequeña posible, debido a que proporcionan una mejor eficiencia y mayor ancho de banda, y que sean relativamente gruesos. Sustratos finos con permitividades relativas más altas suelen ser usados en circuitos de microondas, ya que se necesitan campos unidos para minimizar la radiación no deseada y el acoplamiento, y dar lugar a tamaños de elementos más pequeños. Como desventaja del uso de este tipo de sustratos encontramos que tienen unas mayores pérdidas, lo que se traduce en que son antenas menos eficientes y con un ancho de banda relativamente menor. Desde que las antenas microstrip han sido integradas con otros circuitos de microondas, se ha alcanzado un compromiso para el buen rendimiento de la antena y el diseño de los circuitos impresos.

A menudo se les suele llamar a las antenas microstrip como antenas de parche, porque los elementos radiantes y las líneas de alimentación están normalmente fotograbadas sobre el sustrato dieléctrico. El parche radiante puede tener multitud de formas, puede ser cuadrado, rectangular, una tira fina (dipolo), circular, elíptica, triangular o cualquier otra configuración que se nos ocurra. Los diseños más comunes son el cuadrado, rectangular, dipolo y parche circular, debido a su facilidad de diseño y de fabricación, y sus atractivas características de radiación. Otro tipo de antena tipo parche que ha surgido en los últimos años es la llama antena PIFA (Planar Inverted F Antenna), que

es muy utilizada en las unidades móviles. Básicamente se trata de la mitad de una antena de parche cuadrada, cortocircuitada a masa en uno de los lados.

En este trabajo se diseñarán antenas microstrip con parche cuadrados y circulares, debido a que son las más fáciles de analizar y fabricar.

La tecnología microstrip en la que se basan las antenas descritas anteriormente es el resultado de una evolución que desde siempre ha estado regida bajo el principio de la realización de diseños de un pequeño tamaño tanto en líneas de transmisión como en antenas, que se pudieran integrar en cualquier dispositivo. [\[REF.5\]](#)

2.2 Tipos de ondas en líneas microstrip

Existen cuatro tipos de ondas presentes en los diseños de las líneas microstrip, y por extensión en antenas de parche: ondas espaciales (space waves), ondas de fuga (leaky waves), ondas superficiales (surface waves) y ondas guiadas (guide waves). A continuación hay una breve descripción de todas ellas.

- Ondas espaciales: son las ondas enviadas al espacio libre, pierden magnitud y se atenúan conforme aumenta la distancia. En el diseño de antenas microstrip este tipo de ondas son las de mayor importancia puesto que son las ondas radiadas, mientras que en líneas de transmisión y circuitos estas ondas significan pérdidas de energía y por lo tanto tratarán de eliminarse.
- Ondas superficiales: Estas ondas están comprendidas prácticamente dentro del dieléctrico y no son uniformes. Al ir propagándose a través del dieléctrico, las ondas se encuentran el plano de masa que las refleja al ser fabricado con un conductor perfecto, luego al llegar al corte entre el dieléctrico y el espacio libre se provoca reflexión mediante el esquema conocido como reflexión interna total, de tal forma que las ondas permanecen continuamente viajando dentro del dieléctrico y disminuyendo su energía de forma exponencial. Este tipo de ondas utilizan parte de la energía señal y por lo tanto aumentan las pérdidas del circuito. Además, estas ondas son responsables del acoplamiento entre elementos del circuito. De todo esto se puede llegar a una conclusión clara, que no es otra que las ondas de superficie son perjudiciales tanto para circuitos y líneas de transmisión como para el diseño de antenas, por lo que siempre buscaremos evitar este tipo de ondas.

- Ondas de fuga: Ocurre lo mismo que con las anteriores, con la diferencia que tras haberse producido la reflexión contra el plano de masa, al llegar a la interfaz entre el sustrato y el espacio libre, una parte de la onda es reflejada mientras que la otra parte se transmite al espacio libre (de aquí viene el nombre de las ondas). Este proceso se repite y como una parte sale al espacio libre, la amplitud de las ondas que se van reflejando va disminuyendo con la distancia hasta que desaparecen después de un cierto recorrido.
- Ondas guiadas: son las que menos interés tienen para nuestro caso, ya que solo pueden aparecer en líneas de transmisión, no en las antenas. Se presentan en circuitos impresos y son aquellas que se pueden encontrar cuando la parte superior del sustrato dieléctrico está metalizado casi en su totalidad. Las ondas guiadas entonces se reflejan continuamente en el plano de masa y en dicha parte metálica. Por ello, no es utilizada en aplicaciones de antenas.

Dependiendo de la aplicación que se requiera para una línea microstrip, las necesidades tanto del grosor del sustrato como de la permitividad del mismo son diferentes. Al variar estos parámetros se logra que alguno de los tipos de ondas mencionados anteriormente sea predominante y se logre el comportamiento deseado para la línea.

Para líneas de transmisión y circuitos impresos se busca que la mayor parte de la energía se quede encerrada entre los dos conductores, de tal forma que se suele usar un sustrato muy delgado (eléctricamente hablando) y cuya permitividad relativa sea muy alta. De esta forma se obtienen unas ondas resultantes mayormente guiadas.

En el caso de las antenas se busca totalmente lo contrario para evitar que la energía se almacene en ondas guiadas, para ello se usa un sustrato grueso y de permitividad relativa baja. De esta forma se garantiza que las ondas predominantes en estas estructuras sean las ondas radiadas (espaciales) y tengan comportamiento de antena.

Las ondas superficiales, las menos deseables, podrían utilizarse para acoplar circuitos, pero normalmente son dañinas para nuestros diseños y se intentan eliminar en la medida de lo posible. Por esta razón se trata de evitar la situación en la que el sustrato sea grueso y además tenga una permitividad eléctrica alta, que es el tipo de diseño que haría que las ondas superficiales fueran predominantes.

De todo esto se puede llegar a la conclusión de que las estructuras que funcionan para las antenas tienen propiedad opuestas a aquellas que dan buen rendimiento con circuitos, líneas de transmisión o guías de onda. Es por ello que no se puede lograr un sustrato óptimo que pueda utilizarse para ambas aplicaciones. [\[REF-ELÉC.3\]](#)

2.3 Métodos típicos de alimentación de antenas de parche

Un aspecto muy importante a la hora de diseñar una antena es el esquema de alimentación que tendrá ésta, debido a que sin una buena estructura de alimentación las antenas de parche no funcionarán de forma correcta, sin importar la precisión llevada a cabo para diseñar el elemento radiante. Existen muchos métodos para alimentar una antena de este tipo de forma que radie lo más eficientemente posible en las frecuencias deseadas mediante un acoplamiento correcto de las impedancias. Estos métodos se pueden agrupar en tres categorías principales que se describirán a continuación: alimentación directa, alimentación por proximidad y alimentación por apertura. [\[REF-ELÉC.4\]](#)

2.3.1. Alimentación directa

Tal y como dice su nombre, estos métodos requieren de un contacto directo entre la estructura de alimentación y la antena. La desventaja de estos métodos es que no se puede optimizar por separado el esquema de alimentación y la antena porque trabajan sobre el mismo sustrato, por lo que hay que guardar un compromiso entre las características deseadas de radiación y las características esperadas de alimentación. Los principales métodos de alimentación en esta categoría son dos: alimentación por microstrip y alimentación por conector coaxial.

2.3.1.1 Alimentación por microstrip

Consiste en alimentar al elemento radiante conectándole directamente una línea microstrip diseñada para tener la impedancia que nos interese. Este método es el más sencillo de implementar, sin embargo, es el que peor eficiencia presenta en relación al ancho de banda y al acoplamiento. Hay dos formas principales para alimentar una antena a través de microstrip:

- Conectando la línea microstrip directamente en un borde de la antena: la variación en la posición de la línea microstrip en relación al parche generará una mayor o menos adaptación de impedancia.
- alimentando la línea microstrip a través de inserciones en la antena: en este caso, la profundidad de la inserción es la que nos dice el acoplamiento de la impedancia.

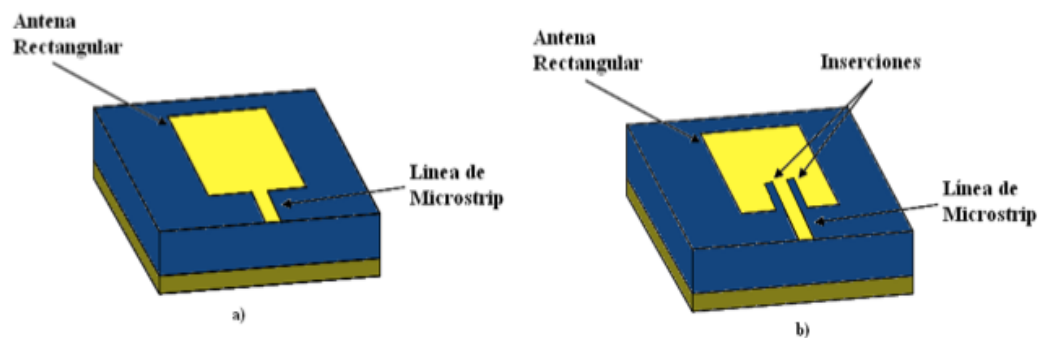


Figura 2.2: Métodos alimentación directa

2.3.1.2 Alimentación directa por sonda coaxial

Este método hace que el conducto metálico del cable coaxial alimente directamente al elemento radiante, mientras que la parte externa de éste se conecta a tierra. La impedancia depende de la posición de la sonda en relación con el elemento radiante de tal forma que colocándola de forma correcta se generará un mejor acoplamiento. Es uno de los métodos más comunes de alimentación para antenas de parche, sin embargo presenta cierto grado de complejidad debido a que el conductor interno del cable coaxial ha de perforar el sustrato y estar soldado a la antena para su funcionamiento óptimo.

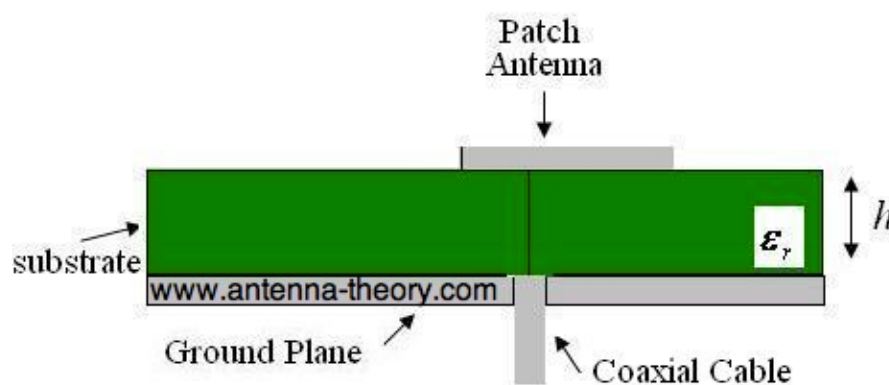


Figura 2.3: Alimentación por sonda coaxial

2.3.2 Alimentación por proximidad

En este tipo de métodos de alimentación no hay contacto directo con el parche radiante, sino que el acoplamiento es electromagnético. Para llevar a cabo esta alimentación se

tiene el elemento radiante sobre un sustrato dieléctrico, y en la parte inferior de la estructura se tiene una línea de alimentación sobre otro sustrato dieléctrico y el plano de masa.

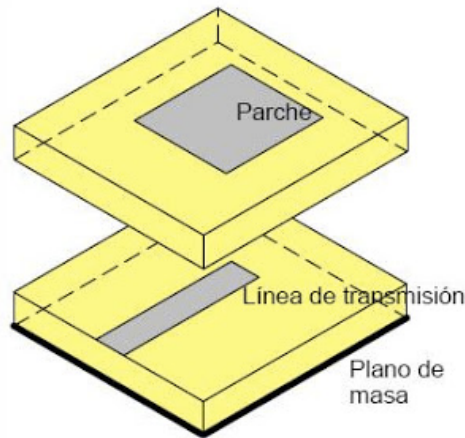


Figura 2.4: Alimentación por proximidad

Esta alimentación tiene la ventaja de que tanto el radiador como la estructura de alimentación pueden optimizarse por separado usando dos sustratos dieléctricos distintos: un dieléctrico más grueso y con permitividad relativa baja para obtener unas buenas características radiantes y otro sustrato delgado y con la permitividad relativa alta para el caso de la alimentación. Además proporciona mayor anchura de banda.

2.3.3 Alimentación por apertura

Es parecido al método explicado en el apartado anterior debido a que también utiliza dos sustratos distintos, uno para el parche radiante y otro para la alimentación del mismo. La estructura de este tipo de alimentación es la siguiente: se tiene un parche radiador sobre un sustrato dieléctrico y sobre un plano de masa. Este plano de masa es compartido con un segundo sustrato dieléctrico para la alimentación, y finalmente hay una línea de alimentación en la parte inferior de la estructura. Una ventaja respecto a la alimentación por proximidad es que al estar la línea de alimentación en la parte más baja y separada de la antena por el plano de masa, la radiación de la línea es mínima en la dirección de máxima radiación de la antena, con lo que evita posibles interferencias y polarizaciones cruzadas.

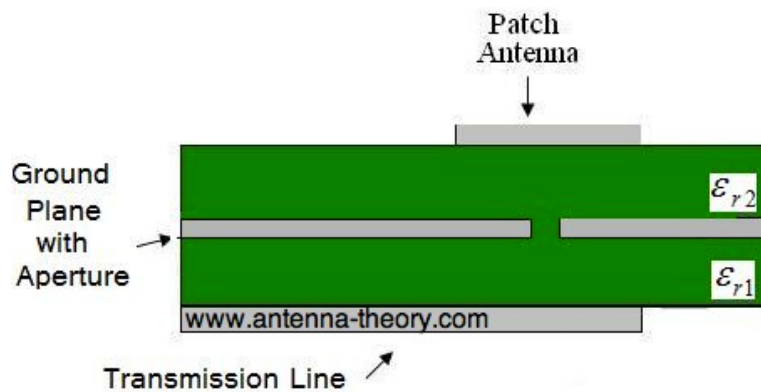


Figura 2.5: Alimentación por apertura

En este trabajo, por simplicidad utilizaremos el primer tipo de alimentación, mediante el uso de un conector coaxial de tipo SMA con impedancia de 50 Ohmios.

2.4 Diseños de antenas de parche

Para la realización de este trabajo de Fin de Grado se ha usado el software de simulación CST Microwave Studio. Se trata de un software de simulación electromagnética muy potente que nos permite realizar diseños previos a la fabricación de las antenas, y obtener todos los parámetros que nos interese conocer de las mismas.

Para el desarrollo de este trabajo nos interesa sobre todo el valor del coeficiente de reflexión que nos da la adaptación de la antena (s_{11}) y los diagramas de radiación de la antena en los planos E y H, y es en lo que nos centraremos mayoritariamente cuando usemos esta herramienta.

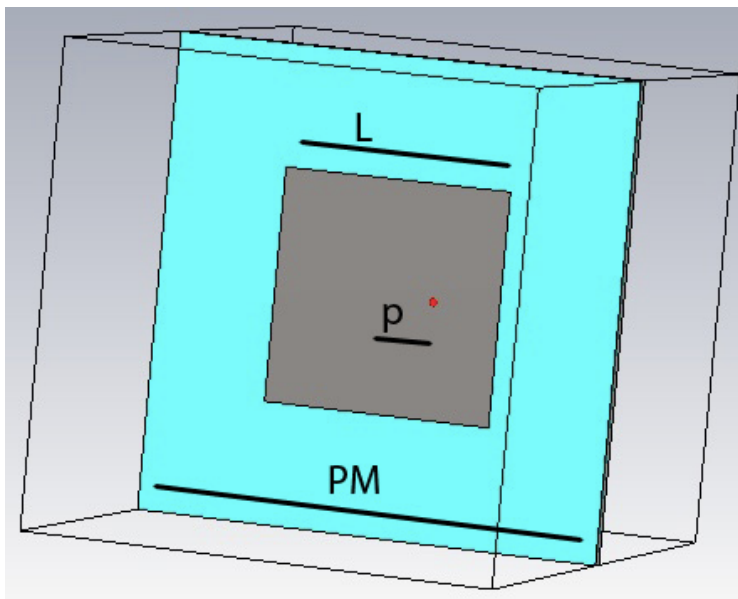
Consideraremos resultados aceptables cuando el ancho de banda de la antena (se calcula mirando el tanto por ciento de señal que hay por debajo de -10dB en el gráfico de s_{11}) sea aproximadamente de un 10%, y nos interesa la topología de antena que nos ofrezca una mayor directividad.

Para comenzar a manejar el software y aprender un poco más de los distintos tipos de antenas de parche, se realiza una primera selección de tres tipos de éstas y se estudia tanto su ancho de banda como sus diagramas de radiación mediante simulaciones. La única limitación de diseño de estas antenas es que trabajen en la banda ISM de 5.8 GHz. Para lograr adaptar una antena de parche a una frecuencia determinada y obtener un alto ancho de banda disponible, podemos variar el lado del parche de la antena y la posición del puerto, ya que los demás parámetros serán fijos en nuestros diseños. Con el lado lograremos adaptar la antena a la frecuencia deseada (cuánto más pequeño sea el lado

del parche, a una frecuencia mayor radiará la antena resultante) y con la posición del alimentador podremos mejorar la adaptación y aumentar el ancho de banda. Habrá que realizar barridos de ambos parámetros para obtener los diseños óptimos. A continuación se presenta la fórmula aproximada de la frecuencia de funcionamiento de una antena de parche en su modo fundamental, siendo L el lado del parche y c_0 la velocidad de la luz en el vacío:

$$f = \frac{c_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

2.4.1 Diseño 1: Parche cuadrado



L: lado del parche = 12.88mm
p: posición del puerto respecto al centro de la antena = 2.3mm
PM: lado del dieléctrico = 30mm

Figura 2.6: Diseño parche cuadrado

Para este diseño, usaremos un sustrato Rogers RO043, cuya permitividad relativa es $\epsilon_r = 3.55$, y que posee un grosor de 0.813mm.

Partimos de un lado $L=15.92\text{mm}$, vamos variando su tamaño, disminuyéndolo ya que, según decrezca el mismo aumentará la frecuencia de operación, como se ilustra en la siguiente figura:

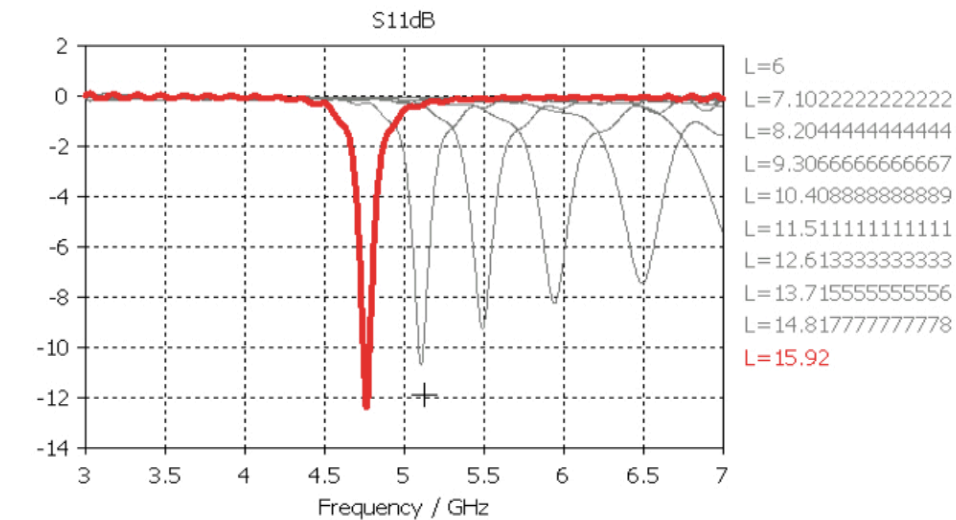


Figura 2.7: Barrido del lado antenna de parche cuadrado

Tras un par de barridos más, se ajusta de forma más precisa la longitud del lado:

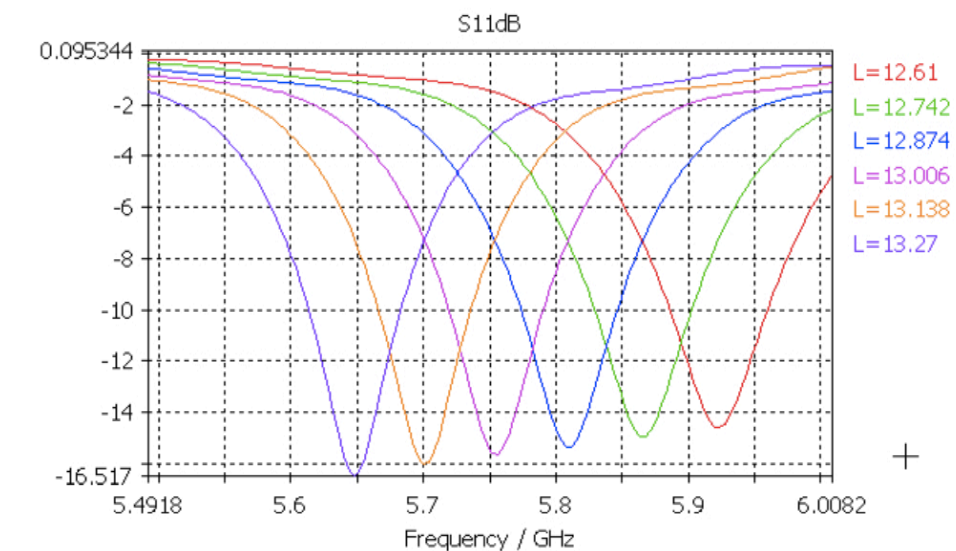


Figura 2.8: Barrido lateral antenna de parche cuadrado

El parche básico cuadrado presentará una polarización lineal.

Del diseño previo tenemos que la posición del puerto óptima es $p=2.3\text{mm}$.

Así, se concluye que el diseño óptimo para funcionar a 5.8 GHz tiene las siguientes características:

Lado dieléctrico (PM)	30mm
Altura dieléctrico (h)	0.813mm

ϵ dieléctrico	3.55
Lado parche (L)	12.88mm
Posición puerto (p)	2.3mm

Obteniendo el siguiente s11 (adaptación):

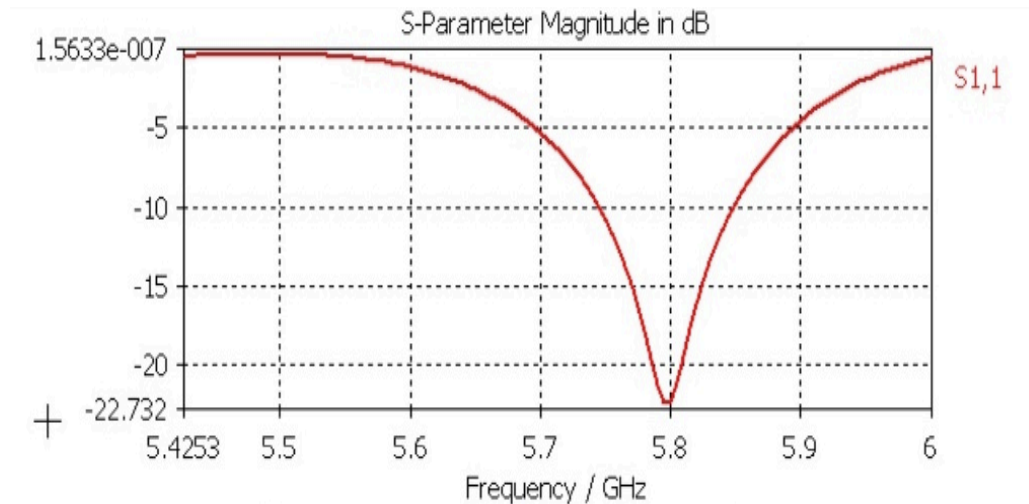


Figura 2.9: s11 diseño inicial cuadrado

En la figura anterior podemos ver el ancho de banda que nos da este diseño, que es aproximadamente de 0.1GHz. Para realizar esta medición se mira los dos puntos de corte con -10dB. Normalmente este dato se da en %.

Para el caso de estudio, nos interesaría un ancho de banda alrededor del 10%, lo que supondría un ancho de banda de 0.58GHz en este caso. Para esta antenna obtendríamos un ancho de banda demasiado pequeño, pero nos interesa saber con qué topología obtenemos un mayor rendimiento de la antenna.

Los diagramas de radiación para $\phi = 0^\circ$ y $\phi = 90^\circ$ son los siguientes:

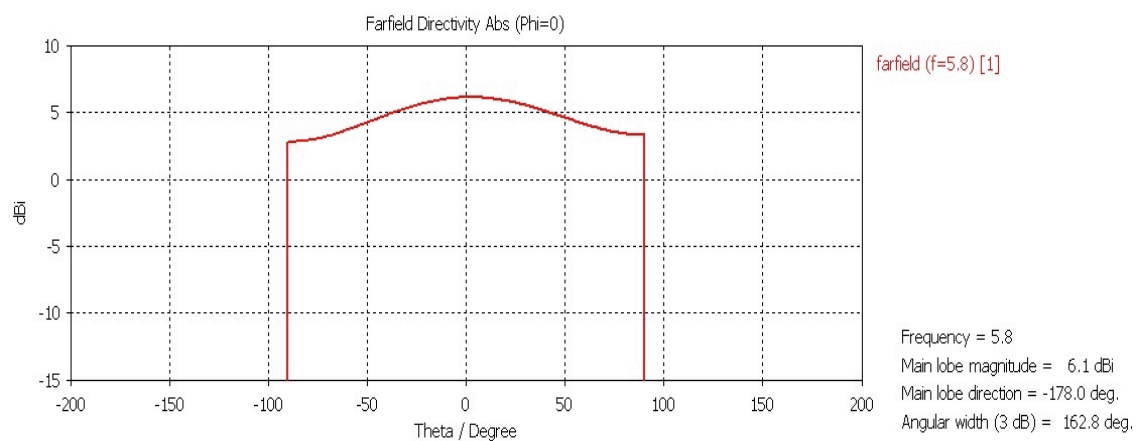


Figura 2.10: Diagrama de radiación en plano E para diseño inicial cuadrado

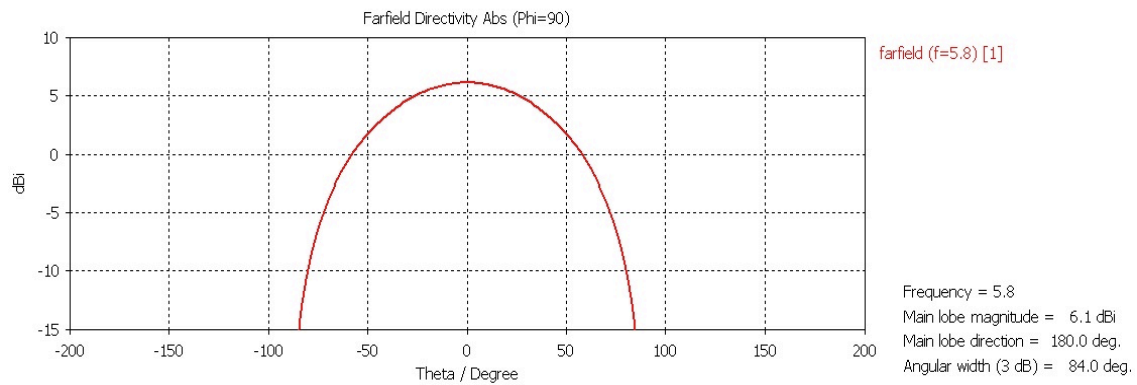
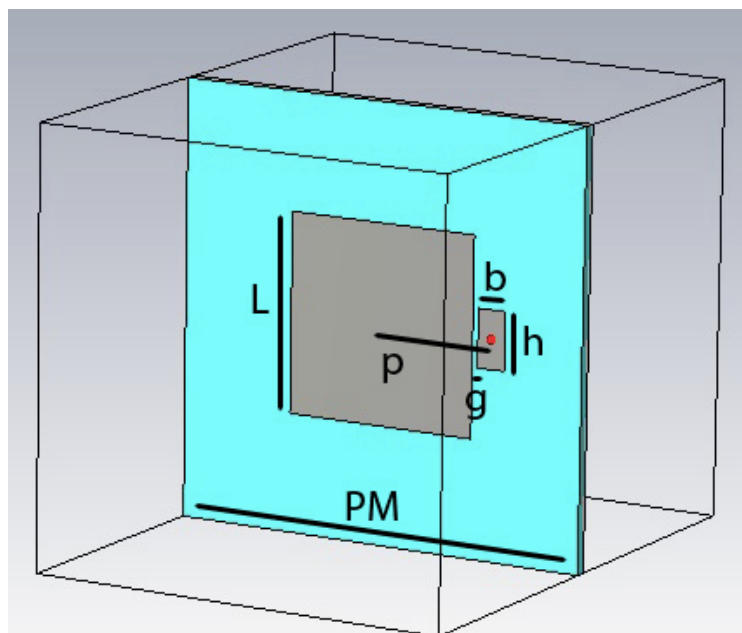


Figura 2.11: Diagrama de radiación en plano H para diseño inicial cuadrado

Como podemos observar se trata de diagramas de radiación de tipo broadside como era de esperar al tratarse del modo fundamental de un parche. La directividad obtenida está en torno a 6 dBi.

2.4.2 Diseño 2: Diseño cuadrado con gap

Normalmente, para aumentar el ancho de banda disponible en una antena microstrip, si no podemos modificar al sustrato, podemos colocar junto al parche del diseño cuadrado normal un pequeño parche rectangular que contendrá al puerto, y que tendrá una separación determinada con dicho parche. Esta separación es el llamado gap.



L: lado del parche = 12.68mm
p: posición del puerto respecto al centro de la antena = 7.55mm
PM: lado del dieléctrico = 30mm
h: altura rectángulo = 4mm
b: base rectángulo = 2mm
g: gap = 0.2125mm

Figura 2.12: Antena de parche con gap

Partiendo del diseño anterior, comenzaremos a realizar simulaciones con un parche de lado $L=12.88\text{mm}$. El nuevo parche que se colocará al lado y tendrá unas dimensiones iniciales de base $b=2\text{mm}$ y altura $h=4\text{mm}$. La posición del puerto será siempre el centro del rectángulo, independientemente de si el valor del gap aumenta o disminuye.

En primer lugar queremos determinar el valor de la distancia entre ambos parches, y para ello realizaremos un pequeño barrido. Hay que tener en cuenta que el parche rectangular no puede estar demasiado lejos del parche cuadrado, por lo que se realiza un barrido de distancias muy pequeñas:

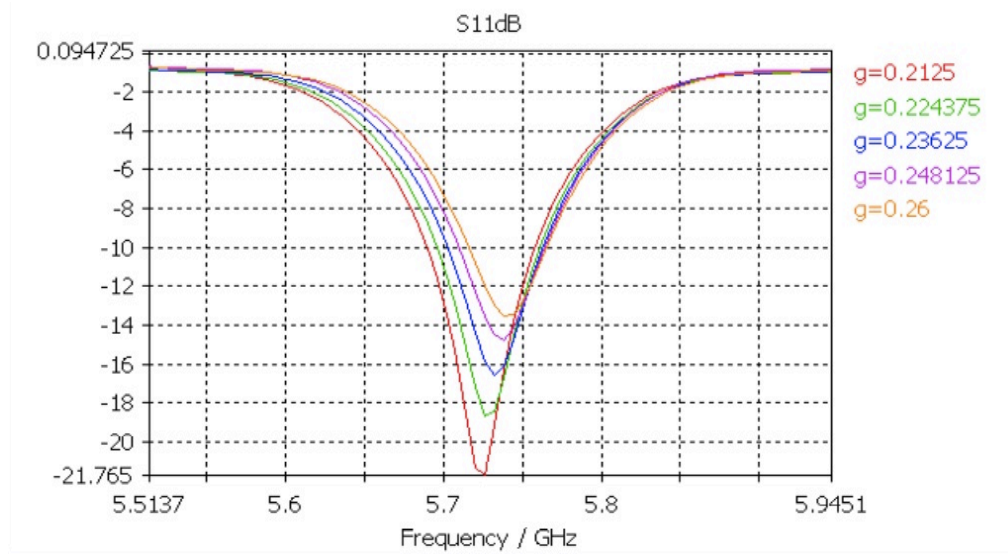


Figura 2.13: Barrido de distancia entre ambos parches para diseño con gap

Como se puede observar en la imagen anterior, el valor del gap que nos proporciona un mayor ancho de banda es $g=0.2125\text{mm}$. También vemos que la antenna ha sufrido una pequeña desadaptación con respecto al caso anterior, ya que recordemos que nuestro diseño deberá funcionar a la frecuencia de 5.8GHz . Podemos variar el lado del parche cuadrado para conseguir la adaptación requerida. Debido a que la primera realización del diseño nos ha adaptado la antenna a una frecuencia menor de la deseada, hay que realizar un barrido de lados más pequeños, para que la frecuencia de operación de la antenna aumente.

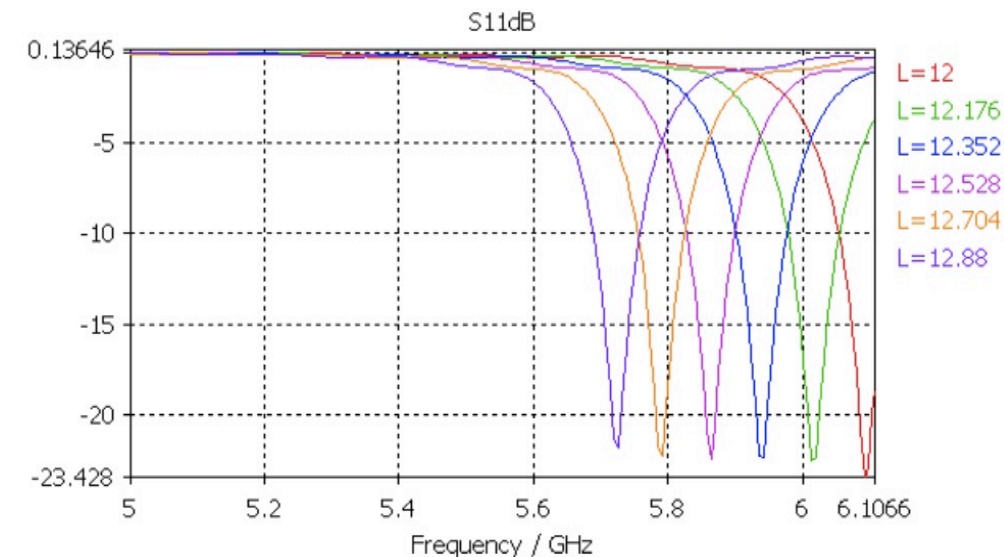


Figura 2.14: Barrido del lado del parche cuadrado para diseño con gap

Haciendo algún mínimo ajuste más en la simulación, obtenemos que el lado que nos proporciona una frecuencia de operación a 5,8GHz es $L=12.68\text{mm}$.

Así, el diseño de esta antena queda definido en la siguiente tabla:

Lado dieléctrico (PM)	30mm
Altura dieléctrico (h)	0.813mm
ϵ dieléctrico	3.55
Base rectángulo (b)	2mm
Altura rectángulo (a)	4mm
Gap (g)	0.2125mm
Lado parche cuadrado	12.68mm
Posición puerto (p)	Centrado en rectángulo

Obteniendo el siguiente coeficiente de reflexión (s_{11}):

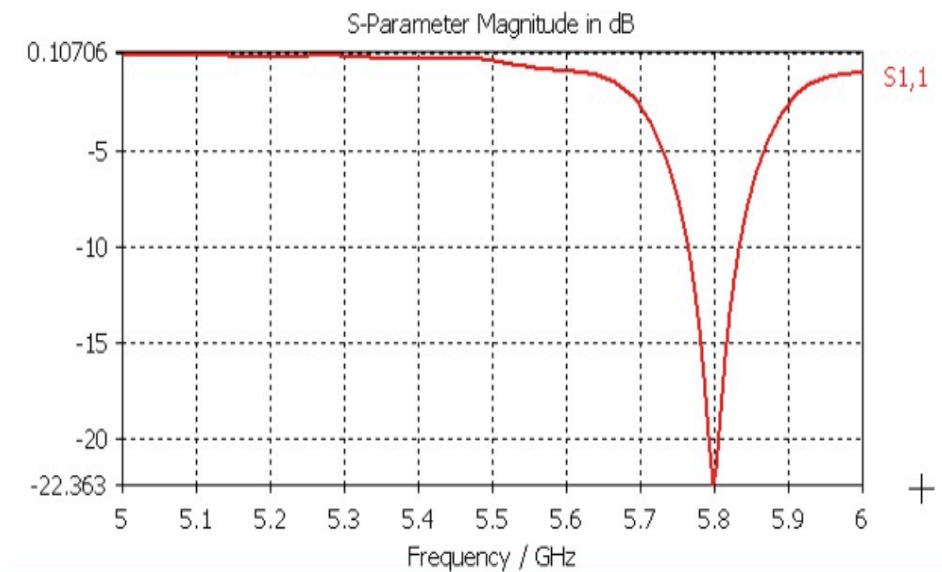


Figura 2.15: s11 diseño inicial con gap

Y los siguientes diagramas de radiación:

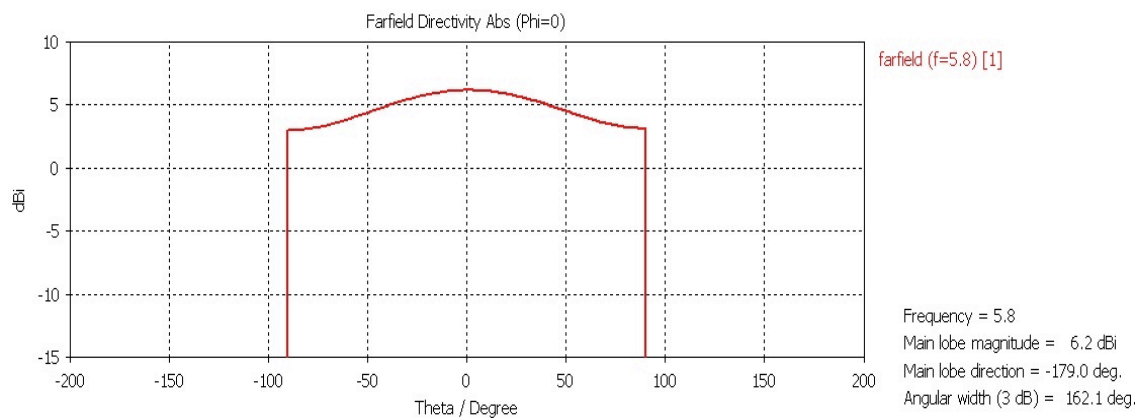


Figura 2.16: Diagrama de radiación en plano E en el diseño con gap

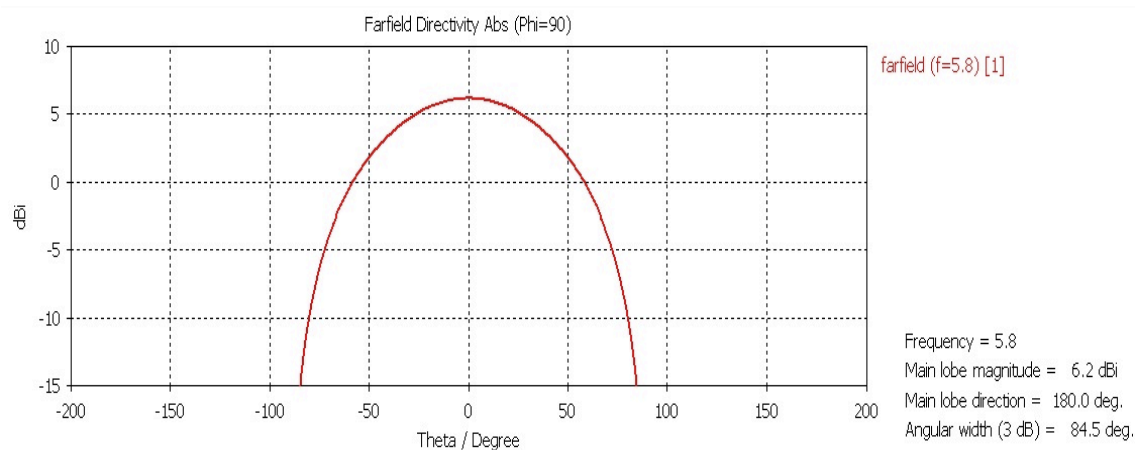


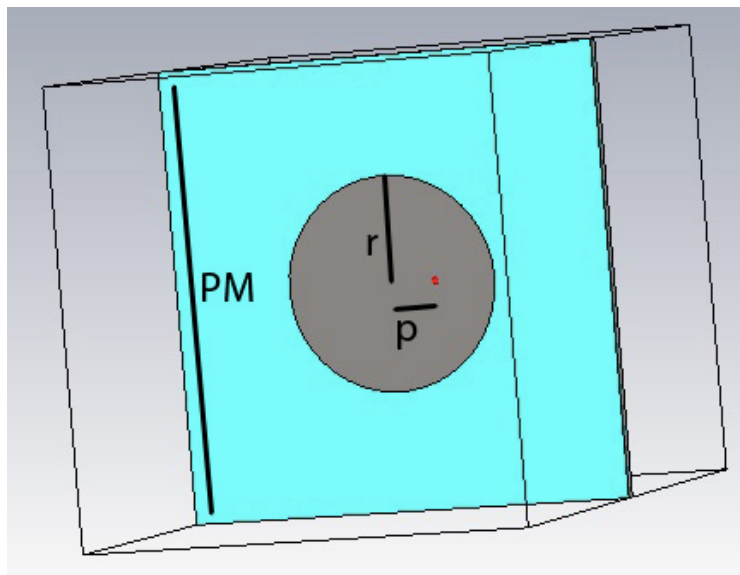
Figura 2.17: Diagrama de radiación en plano H en el diseño con gap

Como hemos podido ver en las figuras de la página anterior, se obtiene prácticamente el mismo ancho de banda que para el primer diseño (0.1GHz) y en los diagramas de radiación apenas podemos ver cambios, ya que tienen la misma directividad. Por lo que no sería efectivo usar este tipo de diseño para nuestro trabajo, ya que entraña más dificultades a la hora de construir que el diseño cuadrado normal y no se obtienen mejores prestaciones.

En realidad, esta alimentación suele ser ventajosa con sustratos gruesos donde suele ser más difícil adaptar la antena usando la alimentación por sonda coaxial presentada en el apartado anterior.

2.4.3 Diseño 3: Diseño circular

A partir del diseño cuadrado del parche realizaremos uno circular para ver si mejora en comportamiento el primer diseño.



r: radio del parche = 7.52mm
p: posición del puerto respecto al centro de la antena = 2.3mm
PM: lado del dieléctrico = 30mm

Figura 2.18: Antena de parche circular

Para realizar una primera aproximación del radio del parche, se suele usar la siguiente correspondencia:

$$r = \frac{L}{2} = 6.44mm \quad (2.2)$$

Con un radio de 6.44mm se obtenía una frecuencia de operación por encima de la esperada (6.75GHz), por lo que tendremos que aumentar el tamaño del radio si

queremos que la antena funcione a 5.8GHz. Mantenemos la posición del puerto como en el diseño inicial ($p=2.3\text{mm}$).

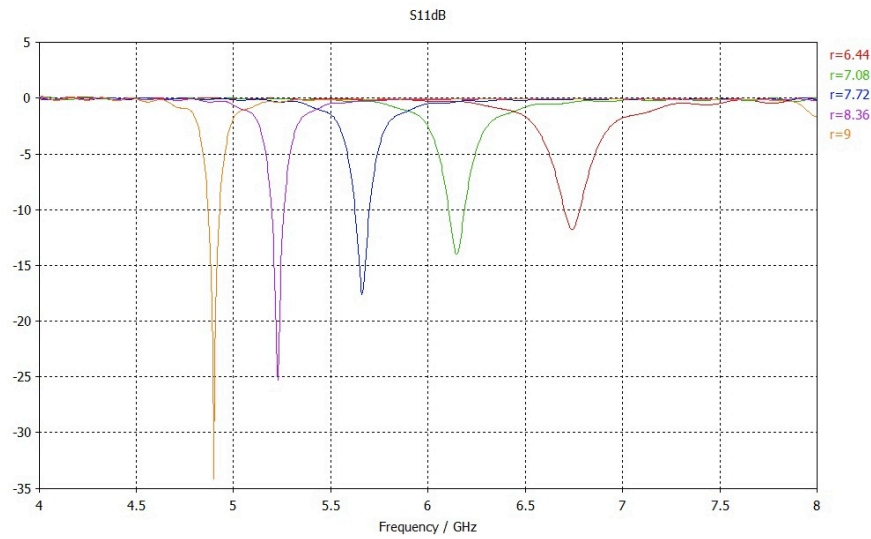


Figura 2.19: Barrido del radio del parche en el diseño circular

Se puede observar que nuestra antena funcionará a la frecuencia deseada cuando su radio esté comprendido entre 7.08 y 7.72, por lo que hay que afinar la búsqueda realizando un segundo barrido del radio.

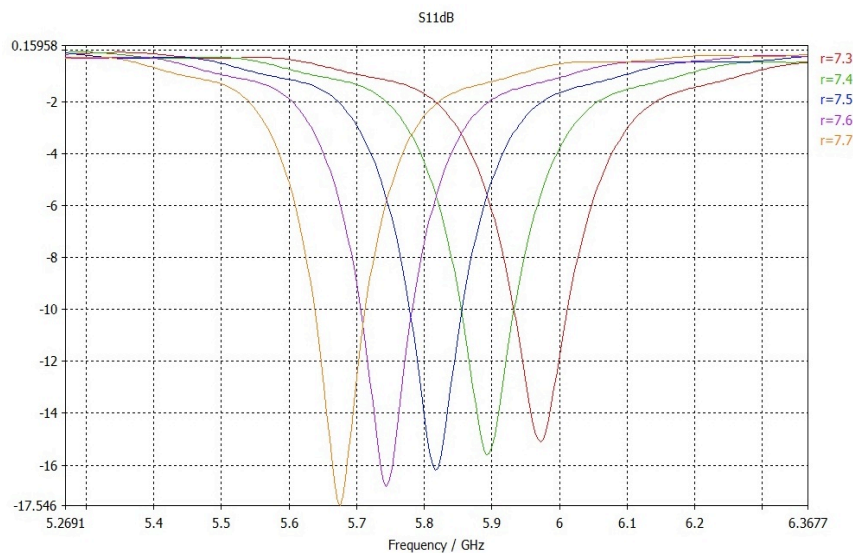


Figura 2.20: Segundo barrido del radio en el parche circular

Vemos que la adaptación óptima se produce cuando el radio está entre 7.5 y 7.6, concretamente en $r=7.52$, quedando un diseño resultante con los siguientes parámetros:

Lado dieléctrico (PM)	30mm
Altura dieléctrico (h)	0.813mm

ϵ dieléctrico	3.55
Radio parche	7.52mm
Posición puerto (p)	2.3mm

Obteniendo para este diseño el siguiente coeficiente de reflexión:

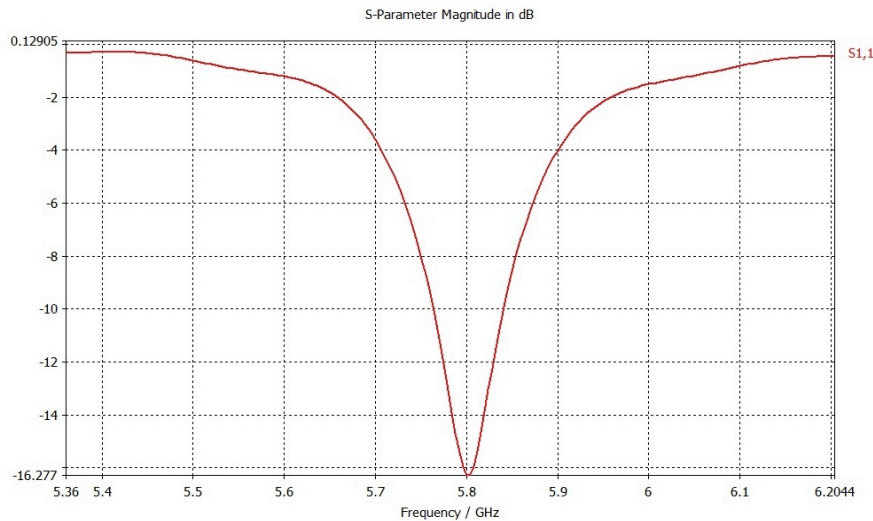


Figura 2.21: s_{11} diseño de la antena con parche circular

Se puede ver en este diseño que se ha perdido algo de ancho de banda respecto a los anteriores, y vemos que el valor de la adaptación alcanza un mínimo menor (unos -16dB cuando antes era -20dB aproximadamente, en el diseño con gap). Por último, veremos los diagramas de radiación en $\phi = 0^\circ$ y $\phi = 90^\circ$:

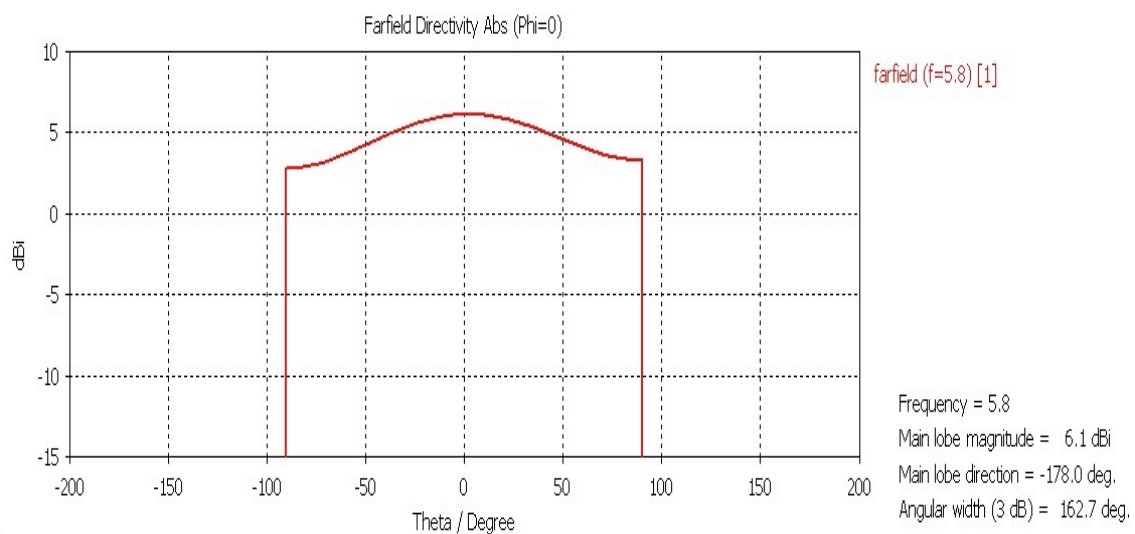


Figura 2.22: Diagrama de radiación en plano E para el diseño de parche circular

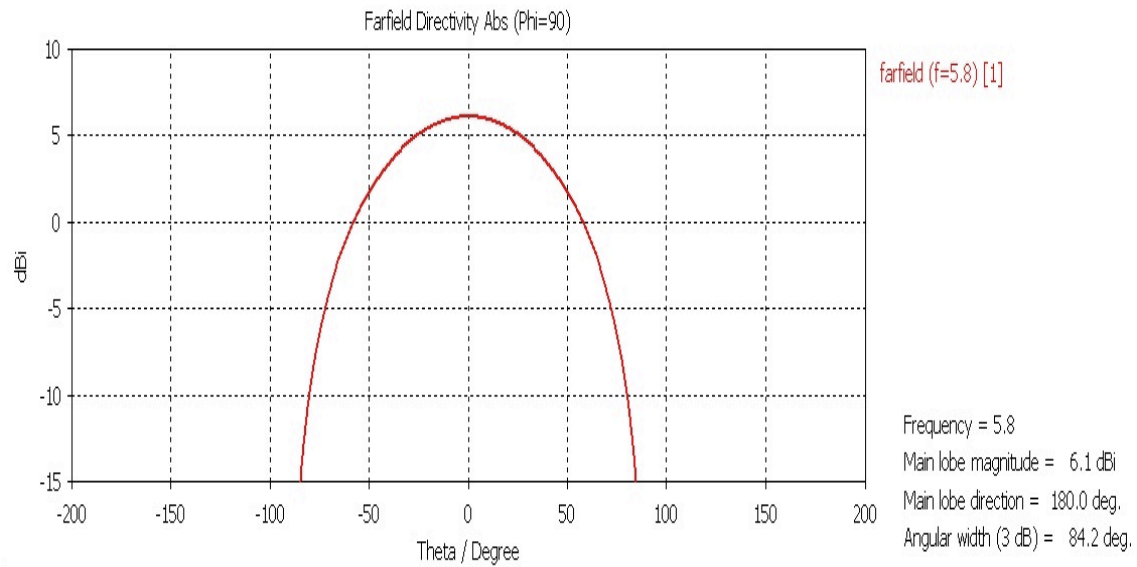


Figura 2.23: Diagrama de radiación en plano H para el diseño de parche circular

La directividad en este caso es comparable a los dos casos anteriores por lo que tampoco aporta ninguna ventaja en ese sentido.

2.5 Comparativa

Por último, vamos a ver una gráfica comparativa de los distintos s11 obtenidos en los diseños para decidir en cuál de ellos se basará nuestra antena final.

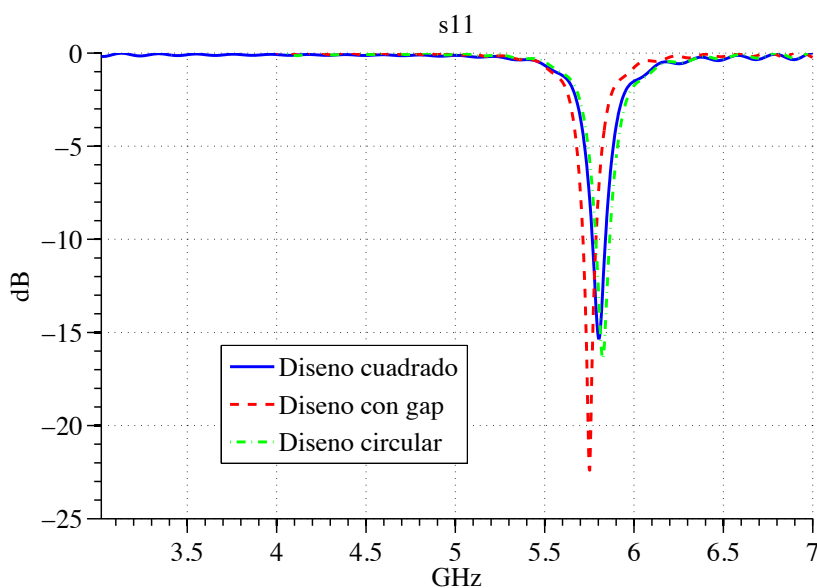


Figura 2.24: Comparativa del coeficiente de reflexión entre los tres diseños iniciales propuestos

Viendo que los anchos de banda que nos pueden proporcionar los distintos diseños para nuestro caso son prácticamente iguales, y que no existen casi diferencias en sus diagramas de radiación, se usará el diseño cuadrado por ser el más simple de fabricación, el más fácil de analizar y el más ampliamente usado.

Capítulo 3. Diseño antenas Fabry-Perot

Una antena resonante Fabry-Perot consiste generalmente en un radiador primario sobre un sustrato dieléctrico y un plano de masa, cubierto de una placa parcialmente reflectante, que recibe el nombre de superestrato. Cuando el espacio entre estas dos placas es un múltiplo entero de $\lambda/2$ el diagrama de radiación mejora notablemente su directividad. Este tipo de antenas permiten que la ganancia se incremente sin mucha complejidad. Además, las diferentes configuraciones de los últimos años han logrado una gran directividad apuntando a broadside.

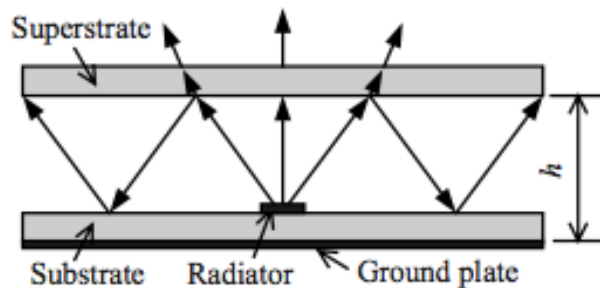


Figura 3.1: Antena del tipo Fabry-Perot

Algunas de las ventajas del uso de este tipo de antenas son:

- La estructura es plana y simple de construir.
- Se obtienen diagramas de haz estrecho sin necesidad de construir un array con su red de alimentación.
- Es capaz de producir haces cónicos en un ángulo especificado.

Por otro lado, estos diseños también tienen algunos inconvenientes:

- Son estructuras de banda estrecha.
- El haz cónico es distinto en los planos E y H, y esta diferencia aumenta a medida que aumenta el ángulo de exploración.
- La forma del haz se limita a un haz directivo apuntando a broadside o un haz cónico, sin más posibles soluciones.

Este tipo de antena comienzan a estudiarse en los años 50 de la mano de G. Von Trentini. Por esa época empezó a estudiar qué ocurría cuando había dos sustratos enfrentados y se producían múltiples reflexiones, y demostró que había un aumento de la directividad al enfrentar al parche radiador una estructura parcialmente reflectante.

[\[REF.6, 7\]](#)

El uso de las antenas Fabry-Perot ha ido en aumento en los últimos tiempos, ya que las nuevas aplicaciones se definen en ondas milimétricas, y son frecuencias que requieren antenas con las siguientes características: alta eficiencia de radiación, de alta ganancia para compensar las pérdidas producidas por propagación, que sea integrable en sistemas planos, con un procedimiento y diseño sencillo y fácil de fabricar, además de un bajo coste tanto de los materiales como de fabricación.

Una aplicación de este tipo sistemas podría ser el uso de antenas Fabry-Perot para comunicaciones entre satélites.

Nosotros partimos de una antena de parche cuadrada como alimentador de la antena, y vamos a estudiar el uso de distintos sustratos con permitividades eléctricas relativas diferentes, para mejorar la directividad de la misma. Nos interesa que nuestra antena funcione a la frecuencia ISM de 5.8GHz y sea lo más directiva posible.

3.1 Diseños previos

Tras la realización de los diseños del capítulo anterior y concluyendo que se va a partir de un diseño de parche cuadrado se va a proceder a sustituir el material dieléctrico anterior por el material textil que tenemos en el laboratorio y que es el que se pretende usar como sustrato en el diseño final. Disponemos de unas capas de tejido textil tipo filtro de una permitividad eléctrica de 1.22 y con un espesor por lámina de 3mm.

Al cambiar la permitividad del material, habrá que recalcular el valor del lado teórico para realizar el diseño. A continuación se detalla como se procede a los cálculos necesarios para diseñar una antena de parche cuadrada compuesta de un sustrato textil y trabajando a 5.8GHz.

$$\lambda_o = \frac{c}{f} = 51.7mm \quad (3.1)$$

$$L = \frac{\lambda_o}{2\sqrt{\epsilon r}} = 23.4mm \quad (3.2)$$

siendo c la velocidad de la luz en el vacío, f la frecuencia de operación (5.8GHz) y ϵr la permitividad eléctrica del material textil.

3.1.1 Diseño con una sola lámina textil

Usando las medidas obtenidas anteriormente, vamos a proceder a la simulación de la antena para ver cuál es el comportamiento de las misma. En primer lugar, usando el lado resultante de la teoría, se realizará un barrido de la posición del puerto para ver cual de ellas nos proporciona una mejor adaptación.

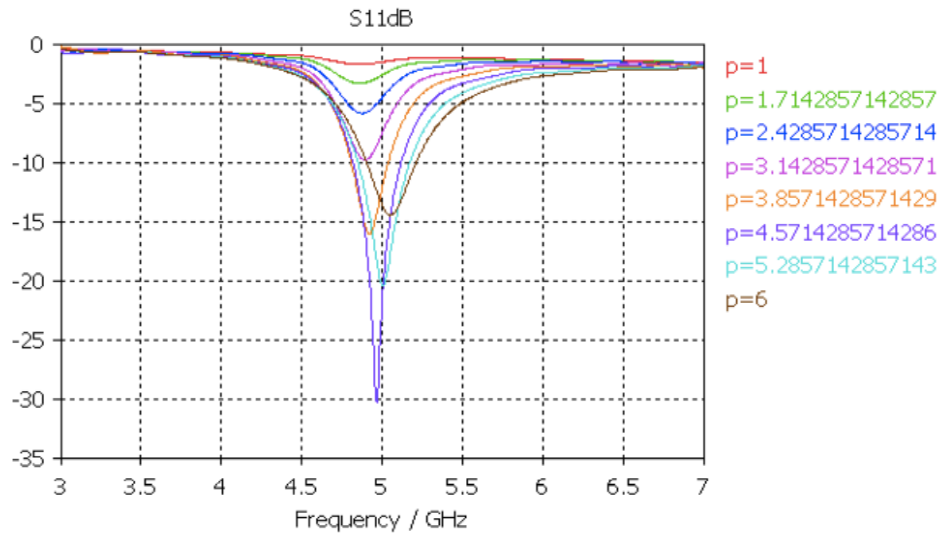


Figura 3.2: Barrido de la posición del puerto con sustrato $h=3\text{mm}$

Se elige la posición $p=5.23\text{mm}$ como la posición provisional del puerto, a la espera de ver si variando el lado teórico que hemos obtenido conseguimos adaptar la antena a la frecuencia ISM. A continuación se muestra el barrido de la longitud del lado:

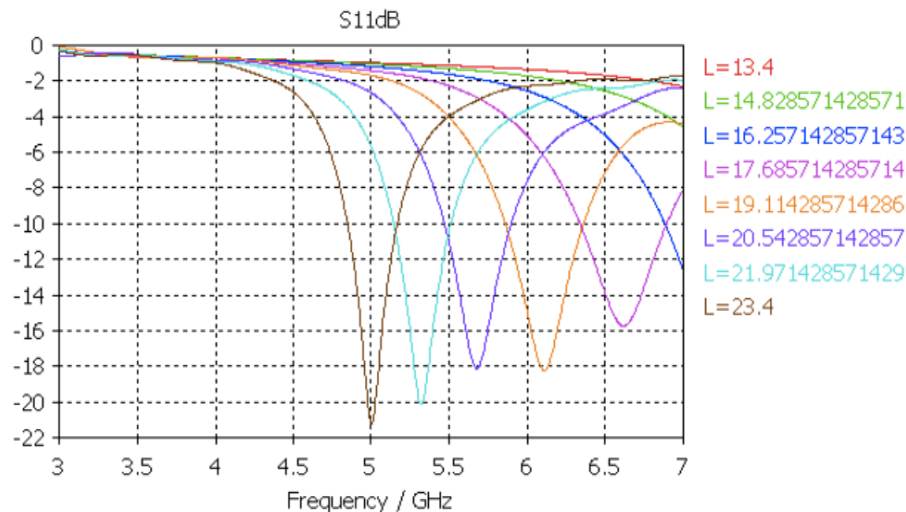


Figura 3.3: Barrido de la longitud del lado con sustrato $h=3\text{mm}$ y $p=5.23\text{mm}$

Como vemos, el resultado que estamos buscando se encuentra entre $L=19.11$ y $L=20.54\text{mm}$. Realizando un par de aproximaciones y simulaciones más, obtenemos que la antena funciona a la frecuencia deseada cuando su lado es de 20.1mm . La antena resultante tendrá los siguientes parámetros:

Lado dieléctrico (PM)	30mm
Altura dieléctrico (h)	3mm
ϵ dieléctrico	1.22
Lado parche (L)	20.1mm
Posición puerto (p)	5.23mm

Obteniendo el siguiente coeficiente de reflexión:

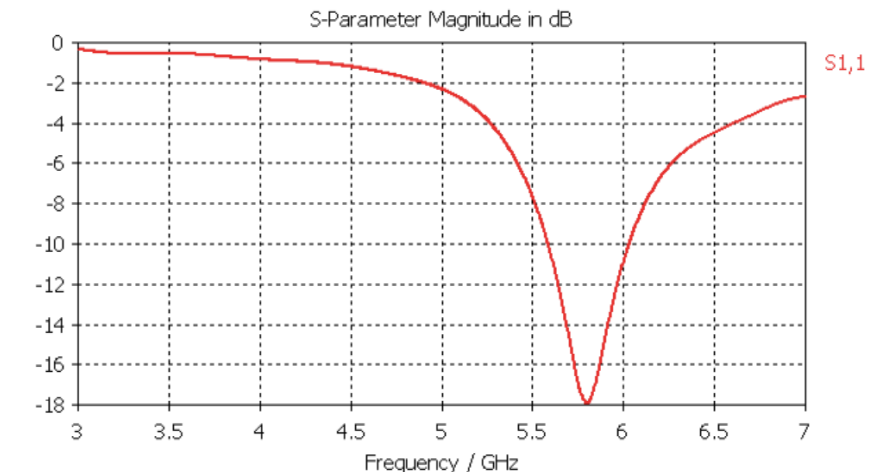


Figura 3.4: Coeficiente de reflexión usando sustrato textil de $h=3\text{mm}$

Vemos que hemos ganado algo de ancho de banda con respecto a los diseños iniciales, debido sobre todo a que hemos aumentado el espesor del sustrato y hemos disminuido su permitividad. Ahora obtenemos un ancho de banda aproximado del 7%, ya que hay una distancia entre ambos puntos de corte con -10dB de unos 0.4GHz . Por otro lado, los diagramas de radiación en los dos planos principales resultan más directivos, alcanzando una directividad cercana a 9 dBi tal y como se muestra en las siguientes figuras:

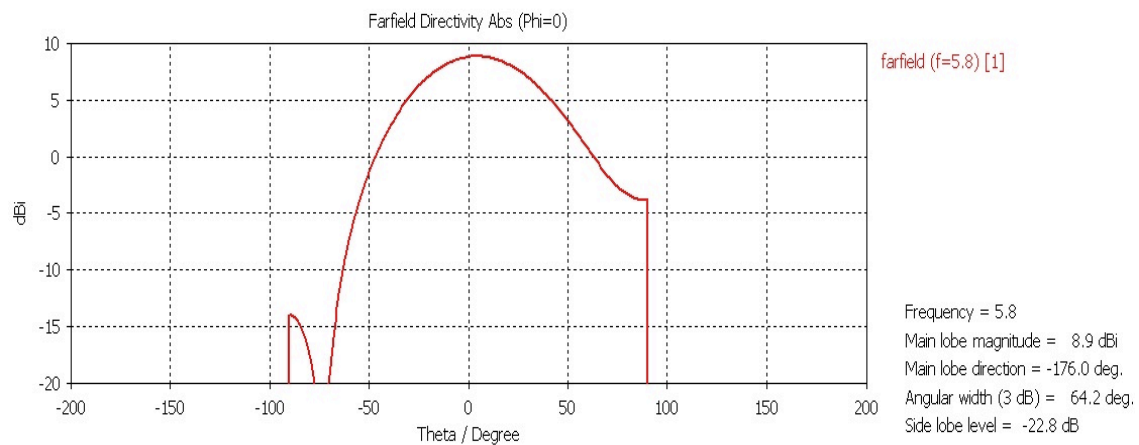


Figura 3.5: Diagrama de radiación en $\phi=0$ con sustrato textil de $h=3\text{mm}$

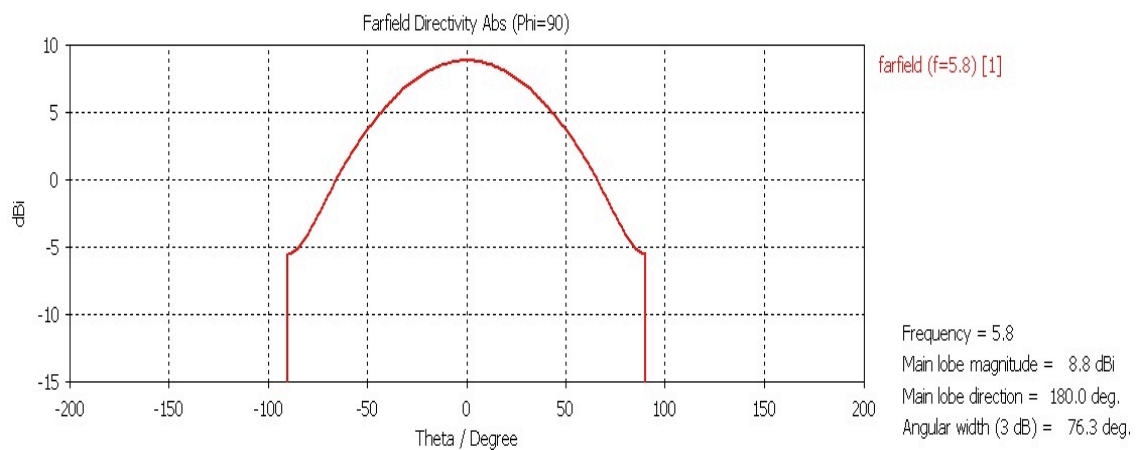


Figura 3.6: Diagrama de radiación en $\phi=90$ con sustrato textil de $h=3\text{mm}$

3.1.2 Diseño con dos láminas textiles

Debido a que contamos en el laboratorio con láminas de material textil de 3mm de espesor, y que sabemos de teoría que un dieléctrico tiende a ofrecer más ancho de banda cuanto mayor es su grosor, vamos a realizar un diseño de la antena, partiendo del anterior, usando dos capas de material textil como sustrato para intentar mejorar el diseño.

Partiendo del diseño anterior, haremos un barrido lateral. Usamos la posición de puerto $p=5.23\text{mm}$, con respecto al centro de la antena, para este primer barrido:

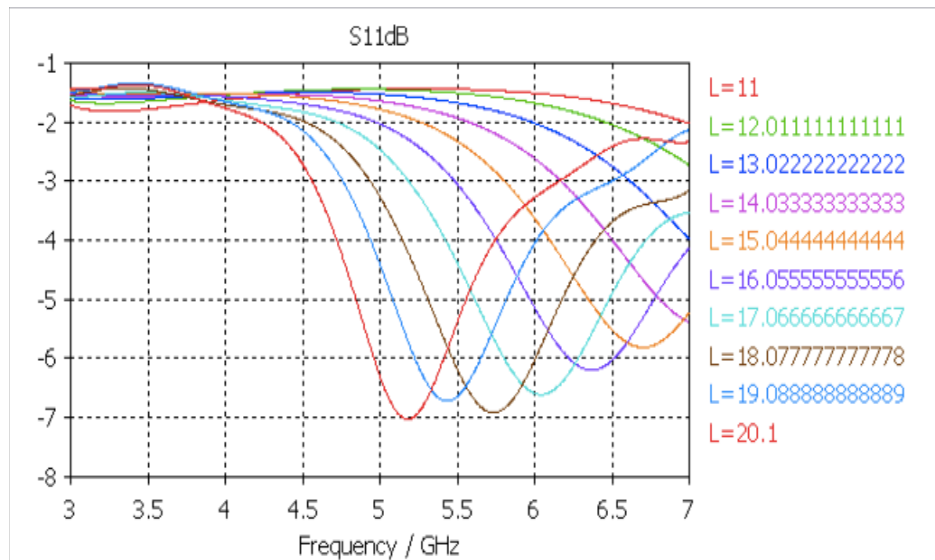


Figura 3.7: Barrido lateral para diseño usando sustrato textil de $h=6\text{mm}$

Tras estos primeros resultados, vemos que la posición del puerto para la que hemos iniciado el diseño no consigue que la antena se adapte a ninguna frecuencia, ya que no obtenemos un valor mínimo de adaptación óptimo, por lo tanto elegimos el lado que haga que nuestra antena trabaje a la frecuencia deseada. El lado que se elige el 18.2mm. Con este lado definido, se realiza un barrido de la posición del puerto para ver cuál de ellas hace que nuestra antena se adapte mejor a la frecuencia de operación.

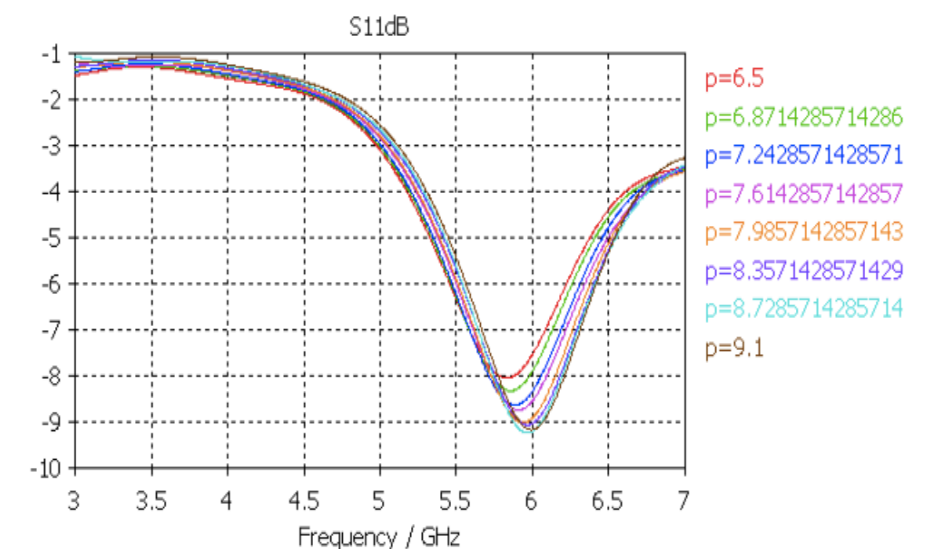


Figura 3.8: Barrido de posición del puerto usando sustrato textil de $h=6\text{mm}$

Como se ve en la gráfica anterior, para el lado escogido no hay ninguna posición del puerto que logre una buena adaptación de la antena a la frecuencia deseada.

Se pudo observar en las pruebas derivadas de este diseño una clara tendencia a adaptarse la antena cuando se aumenta de forma considerable el lado. Esto es debido a que se logra excitar un modo distinto del fundamental, algo que no nos interesa hacer en este trabajo.

Tras la realización de las distintas pruebas sin obtener resultados positivos a la frecuencia deseada, se concluye que no es posible la adaptación con las condiciones que se proponen debido a que el sustrato es muy grueso, y esto hace que la sonda coaxial dé lugar a una impedancia demasiado inductiva.

Una posible solución a este problema sería usar un parche cuadrado con alimentación por gap como se usó en el capítulo anterior para hacer pruebas, ya que este tipo de parches suelen ofrecer buenas condiciones de adaptación con sustratos más gruesos.

3.2 Diseños Fabry-Perot

Hasta ahora todos los diseños realizados han sido de antenas de parche simples. Como nuestra intención es que la antena sea directiva, vamos a incluir distintos superestratos a una distancia determinada ($\lambda o/2$) y vamos a estudiar el comportamiento que sufre la antena con cada uno de estos.

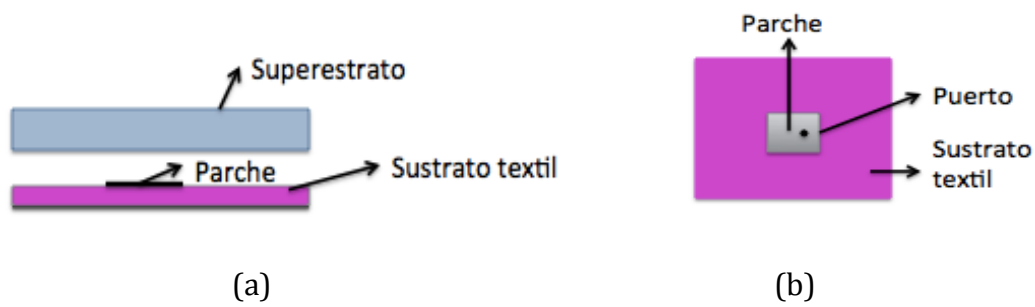
Para la realización de este tipo de diseños hay que tener claro algunos conceptos:

- La distancia entre la parte inferior del sustrato y la parte inferior del superestrato debe ser exactamente $d = \lambda_{material}/2$, donde:

$$\lambda_{material} = \frac{\lambda o}{\sqrt{\epsilon r}} \quad (3.3)$$

- El espesor del súper estrato depende de la permitividad del mismo, siguiendo la ecuación que se muestra a continuación:

$$espesor = \frac{\lambda o}{4\sqrt{\epsilon r}} \quad (3.4)$$



Figuras 3.9: antena Fabry-Perot vista desde el lateral (a) y antena de parche vista desde arriba (b)

Además, hay que tener en cuenta que el tamaño total de la antena, tanto del sustrato como del superestrato, es de $8\lambda \times 8\lambda$.

También es determinante el grosor total que tendrá la antena, ya que luego hay que integrar la misma en la ropa, y el perfil de esta no puede sobresalir demasiado, ya que ocasionaría diversos problemas.

En el estudio de este tipo de antenas nos interesa tanto la directividad de la misma para cada caso, como el ancho de banda que pueden ofrecer los distintos superestratos. Habrá que buscar un equilibrio entre ambos para lograr un diseño óptimo. Se han realizado pruebas para 4 superestratos distintos, variando en ellos tanto su permitividad como su espesor (que afectará al espesor total de la antena), ya que ambas cosas están relacionadas como se ha explicado con anterioridad.

Cuanto mayor es la permitividad relativa del material más estrecho será el superestrato, pero a su vez será más denso y producirá una mayor reflexión.

A continuación podemos observar el coeficiente de reflexión para estos casos y una comparativa entre ellos:

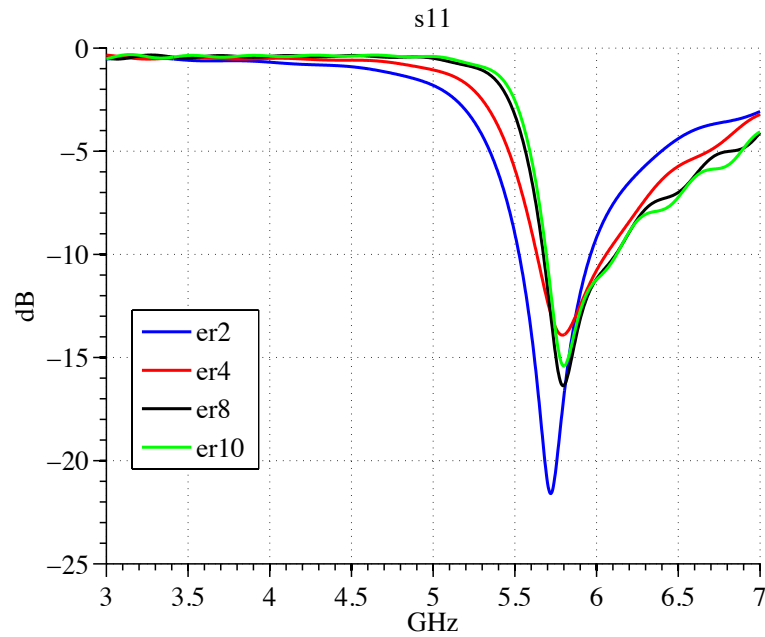


Figura 3.10: Comparativa del coeficiente de reflexión usando sustrato textil y variando la permitividad del superestrato

Se puede observar que se obtiene un mayor ancho de banda con el superestrato más grueso que corresponde a una permitividad menor. Los anchos de banda están en torno el 8-9% en todos los casos. Ahora nos fijaremos en los diagramas de radiación de los planos principales para ver qué ocurre con la directividad a medida que cambiamos la permitividad del superestrato. El tamaño total de todos los diseños es de $8\lambda_o \times 8\lambda_o$.

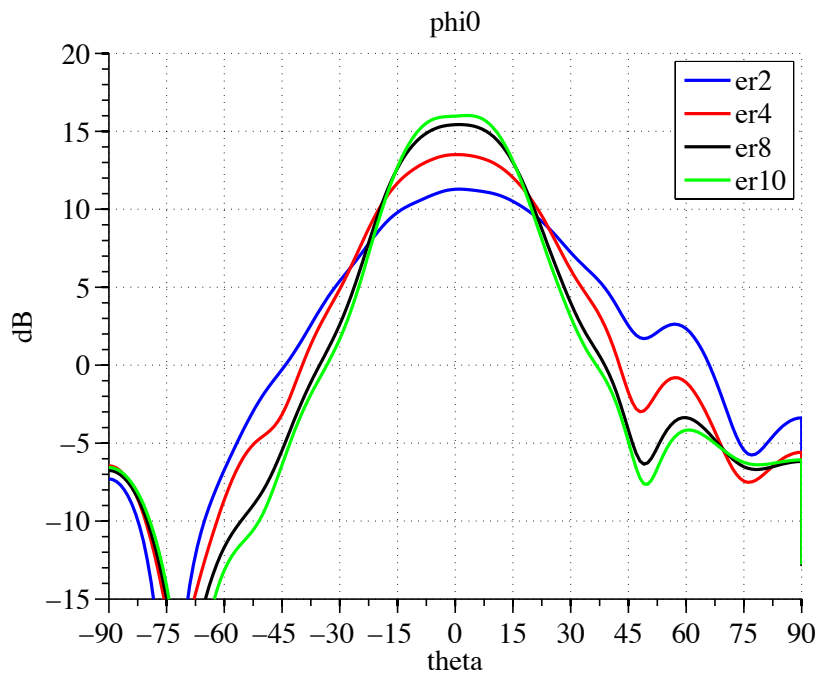


Figura 3.11: Comparativa del diagrama de radiación en $\phi=0$ usando sustrato textil y variando la permitividad del superestrato

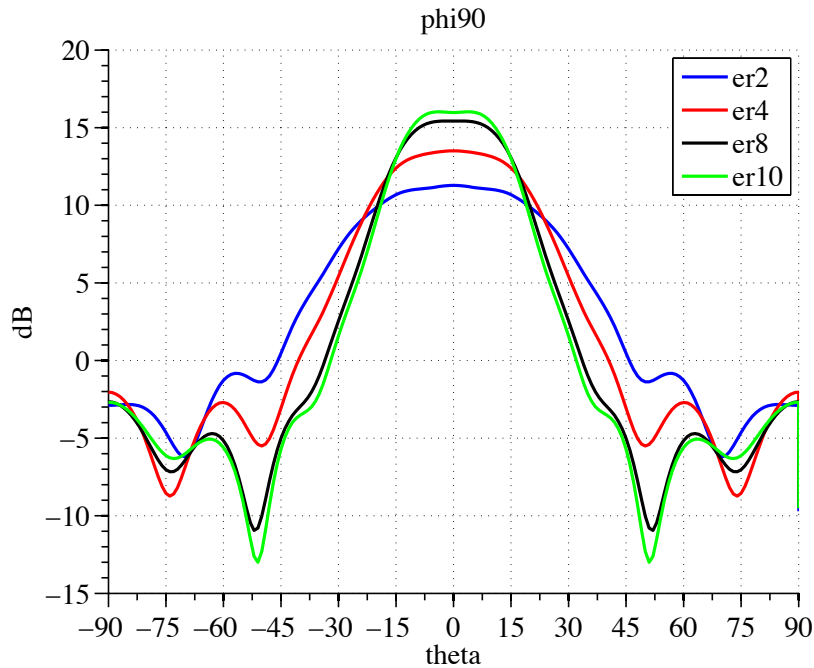


Figura 3.12: Comparativa del diagrama de radiación en $\phi=90$ usando sustrato textil y variando la permitividad del superestrato

Se observa una clara tendencia a ganar directividad según crece la permitividad eléctrica relativa del superestrato, algo que era de esperar según la teoría de las antenas Fabry-Perot ya que existe mayor reflexión en el superestrato y por tanto se consigue iluminar una apertura mayor, lo que genera una mayor directividad.

Es importante destacar en cualquier caso el considerable aumento de directividad conseguido con respecto a la antena de parche elemental y hay que resaltar que la complejidad de esta nueva antena es similar a la del parche.

Debido a que nos preocupa para este diseño más la directividad que el ancho de banda disponible ya que la banda ISM es muy estrecha, se elige el diseño que ofrece una mayor directividad, que es usando un superestrato de permitividad relativa $\epsilon_r = 10$. A continuación se detallan las medidas del diseño:

Lado dieléctrico (PM)	$8 \lambda_0$
λ_0	51.7mm
ϵ_r sustrato	1.22
ϵ_r superestrato	10
Espesor súper estrato	4.09mm
Altura sustrato (h)	3mm

Lado parche	20.1mm
Posición puerto (p)	5.23mm

Como nos interesa aumentar la directividad de la antena, vamos a estudiar el efecto del tamaño de la antena cambiando el tamaño tanto del sustrato como del superestrato. Para el estudio, se van a diseñar dos antenas nuevas, una de mayores dimensiones y otra más pequeña, para ver qué ocurre tanto en los diagramas como en la adaptación de la antena en cada caso. Se procede al diseño de una antena más pequeña en dimensiones, concretamente de $6\lambda \times 6\lambda$, y la antena grande tendrá unas dimensiones de $12\lambda \times 12\lambda$. A continuación podremos ver las figuras donde se comparan los distintos resultados obtenidos para la antena inicial, es decir, la antena de lado $8\lambda \times 8\lambda$:

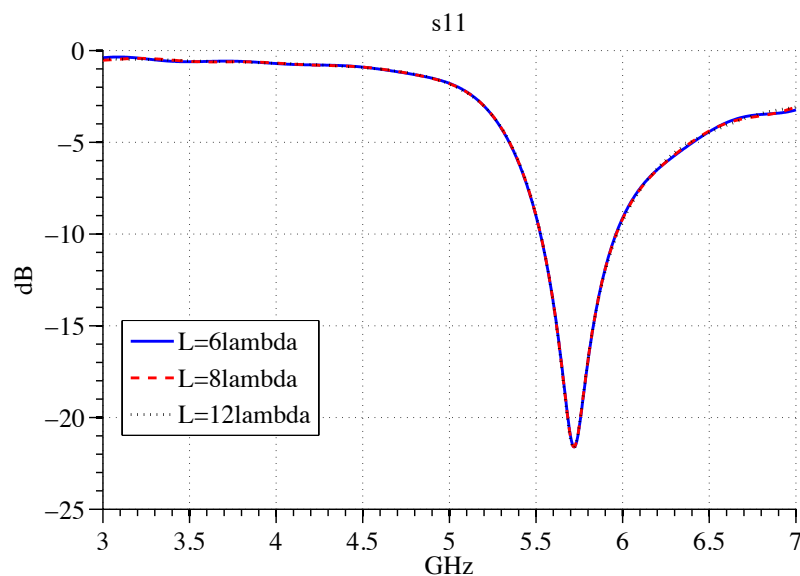


Figura 3.13: Comparativa del coeficiente de reflexión usando distintos tamaños de antena

Como se ve en la figura anterior, en la adaptación no hay ningún cambio con este parámetro.

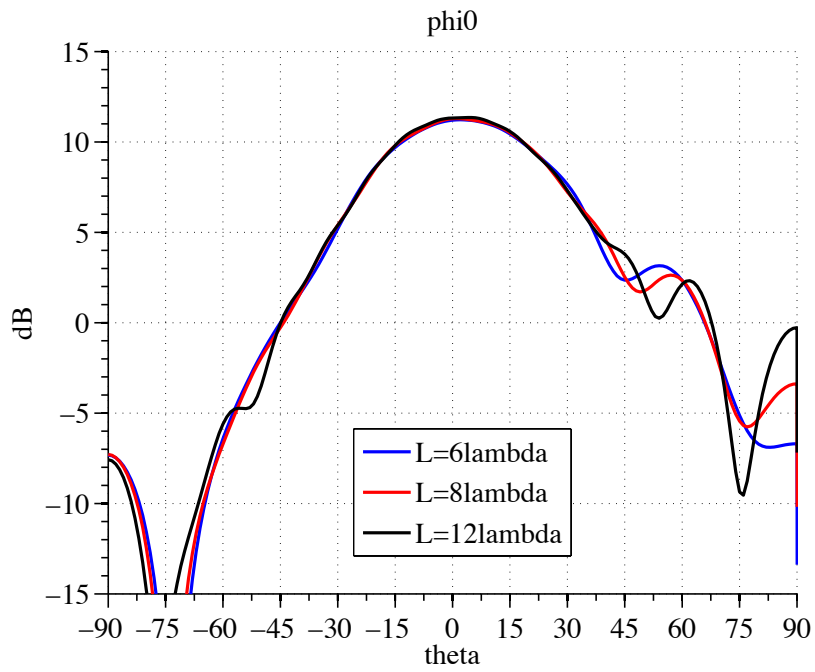


Figura 3.14: Comparativa del diagrama de radiación en $\phi=0$ usando distintos tamaños de antena

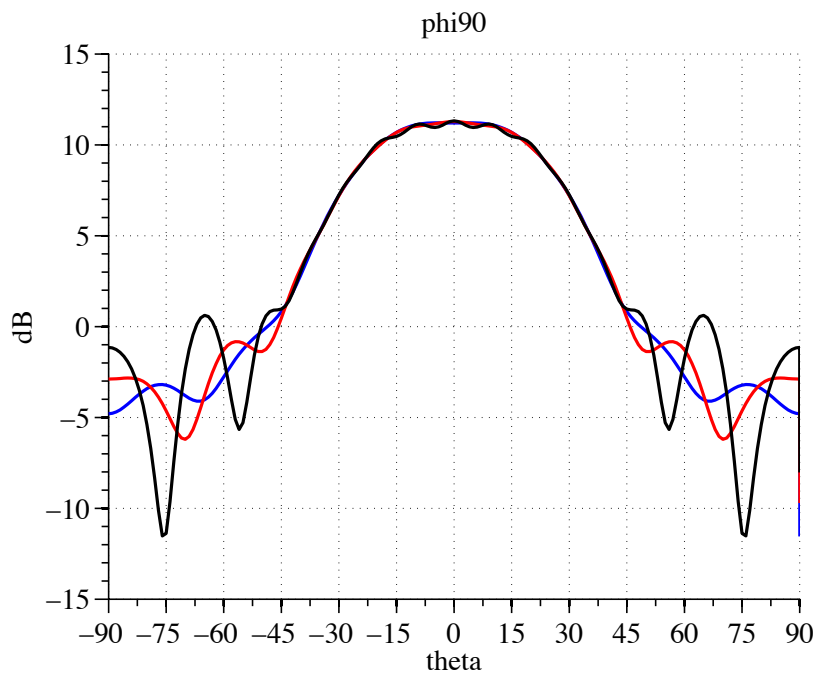


Figura 3.15: Comparativa del diagrama de radiación en $\phi=90$ usando distintos tamaños de antena

Como vemos en ambas figuras los diagramas de radiación son bastante estables en este caso, por lo que se descarta de momento aumentar o disminuir el tamaño del diseño final para aumentar la directividad. Mirando las gráficas por separado se pudo ver que ganábamos aproximadamente 0.1 dBi de directividad con cada aumento, es decir, de la antena pequeña (6λ) al diseño estándar (8λ) perdíamos ese nivel de directividad, y de la antena grande (12λ) al diseño estándar ganábamos este valor.

Se esperaba ganar algo de directividad aumentando el tamaño de la antena, ya que de este modo, las ondas reflejadas entre el sustrato y el superestrato llegan más atenuadas a la discontinuidad final, al tener que recorrer más espacio para llegar al mismo punto y se podría iluminar una superficie mayor del superestrato lo que daría lugar a una mayor apertura.

El principal problema que tiene este tipo de diseños, es que al usar aire como material entre el sustrato y el superestrato, la distancia entre ambos crece, y esto hace que la antena sea demasiado gruesa para integrarla en la ropa. En los casos estudiados, la antena más fina de todas sería la que usa un superestrato con permitividad mayor (espesor=4.09mm, calculado anteriormente), y esta antena tendrá el siguiente grosor total que es quizás un poco alto para ser integrado en la ropa:

$$h_{total} = h_{sustrato} + \frac{\lambda_o}{2} + espesor = 32.95mm \quad (3.5)$$

Capítulo 4. Estudio del efecto de curvatura en antenas Fabry-Perot

Perot

En este capítulo vamos a estudiar cuál es el efecto que tiene una pequeña curvatura en la antena, para tener en cuenta la curvatura de la espalda o de un brazo a la hora de implementar el diseño final.

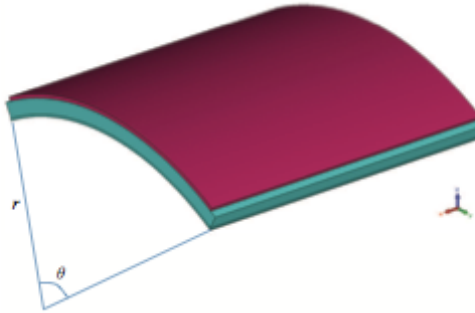


Figura 4.1: Antena curvada

Partimos de un diseño de antena Fabry-Perot trabajando a la frecuencia ISM de 5.8 GHz, la cual está formada por material textil y caucho, materiales que tenemos disponibles en el laboratorio y de los que hemos hablado y caracterizado anteriormente. El diseño del que se parte está formado por un sustrato textil con permitividad $\epsilon_r = 1.22$ sobre el que se pone el parche, a continuación hay otra capa de material textil para finalizar la estructura con un superestrato de caucho ($\epsilon_r = 5.85$), del que obtenemos las siguientes figuras.

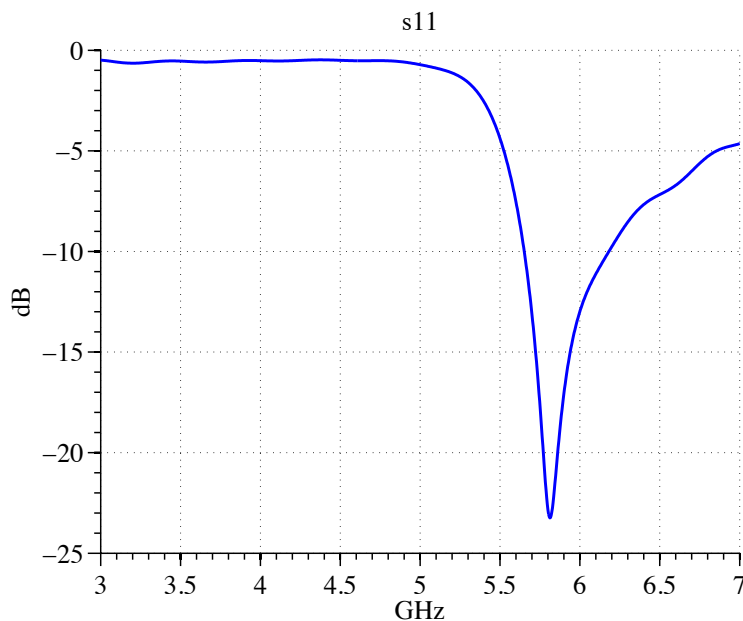


Figura 4.2: Coeficiente de reflexión del diseño sin curvatura

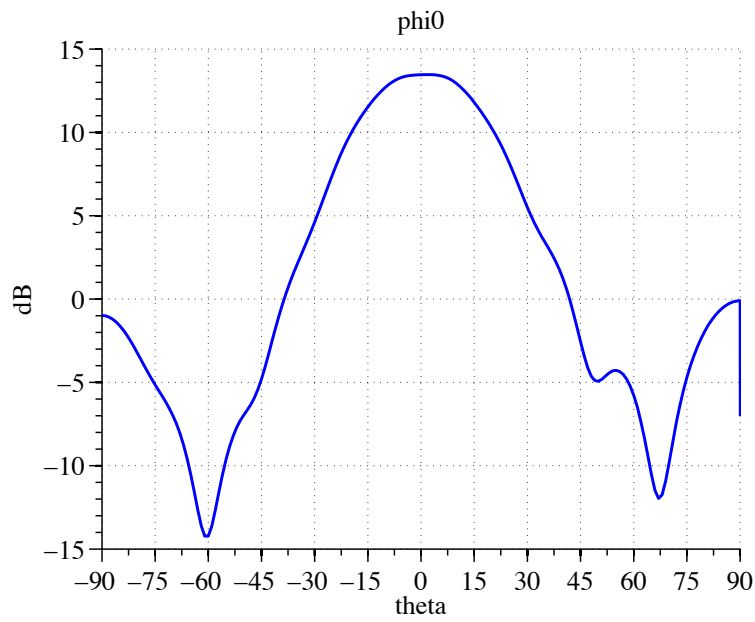


Figura 4.3: Diagrama de radiación en $\phi=0$ para el diseño sin curvatura

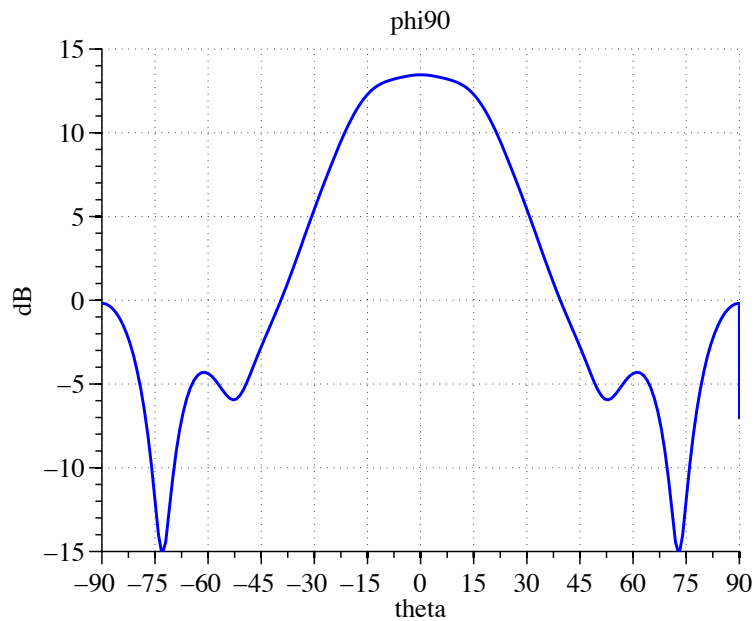


Figura 4.4: Diagrama de radiación en $\phi=90$ para el diseño sin curvatura

Los resultados son totalmente los esperados para una antena Fabry-Perot formada por los materiales mencionados anteriormente, obtenemos una adaptación bastante buena que nos proporciona un ancho de banda lo suficientemente amplio para nuestras aplicaciones, en concreto un 10%, además de diagramas bastante directivos en ambos planos.

Ahora la antena se dobla alrededor de un cilindro, como se ha mostrado en la figura anterior, para tener en cuenta el efecto que provoca dicha perturbación. En la práctica, esta curvatura se baja usando grandes radios de curvatura que se corresponden con curvaturas reales de una espalda o un brazo. Los resultados para la flexión de la antena alrededor de un cilindro con diferentes radios, tanto en el plano E como en el plano H se muestran en las siguientes figuras. El diseño corresponde a una geometría como la que se ha descrito anteriormente con un tamaño de sustratos/ superestratos de $8\lambda \times 8\lambda$. También se incluyen en las simulaciones algunos diseño de la misma antena pero con un tamaño total de $4\lambda \times 4\lambda$ (nombrado como “small” en las leyendas), concretamente se incluyen este tipo de resultados para dos radios de curvatura distintos.

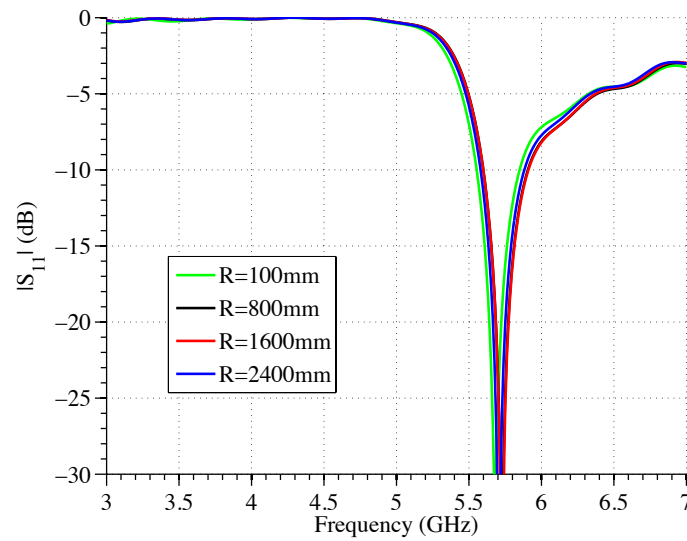


Figura 4.5: Coeficiente de reflexión doblando la antena por el plano E

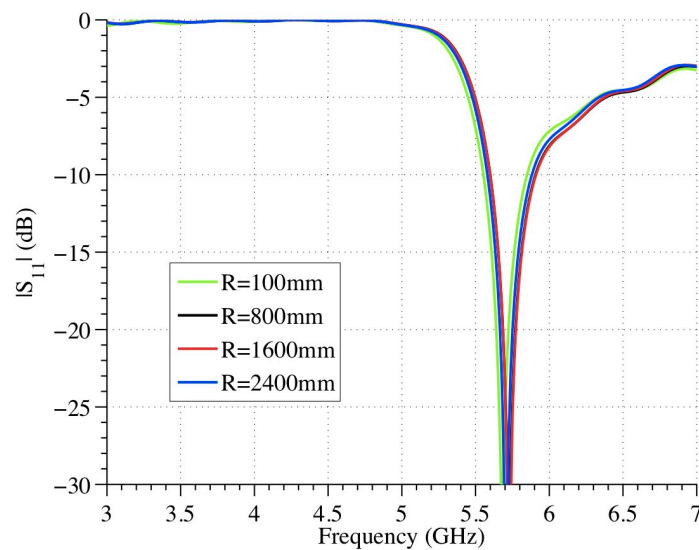
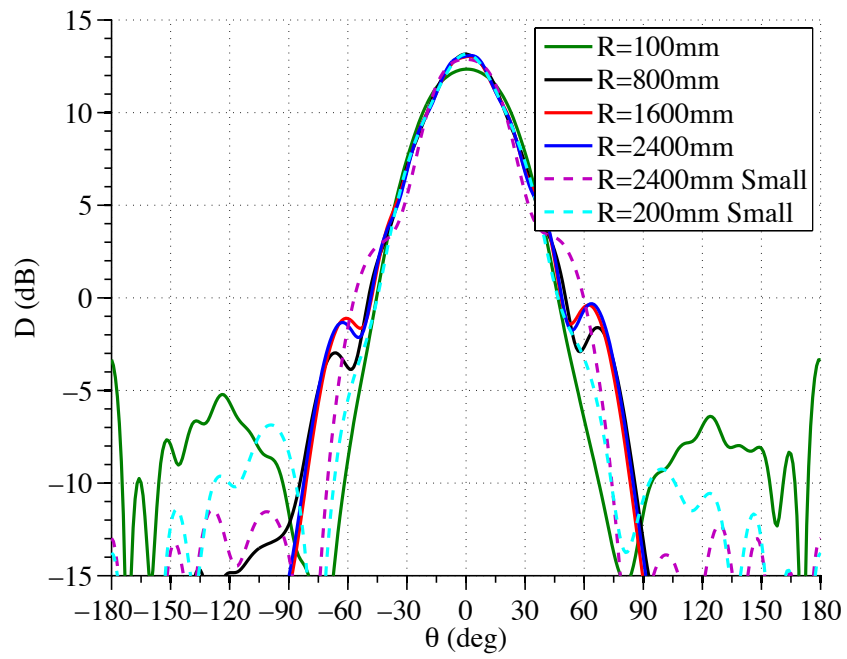
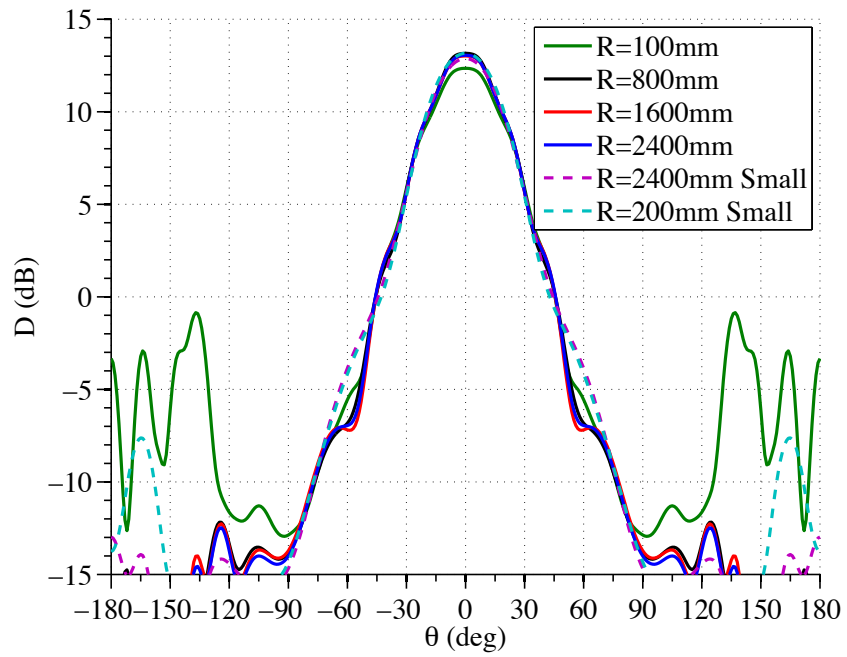


Figura 4.6: Coeficiente de reflexión doblando la antena por el plano H

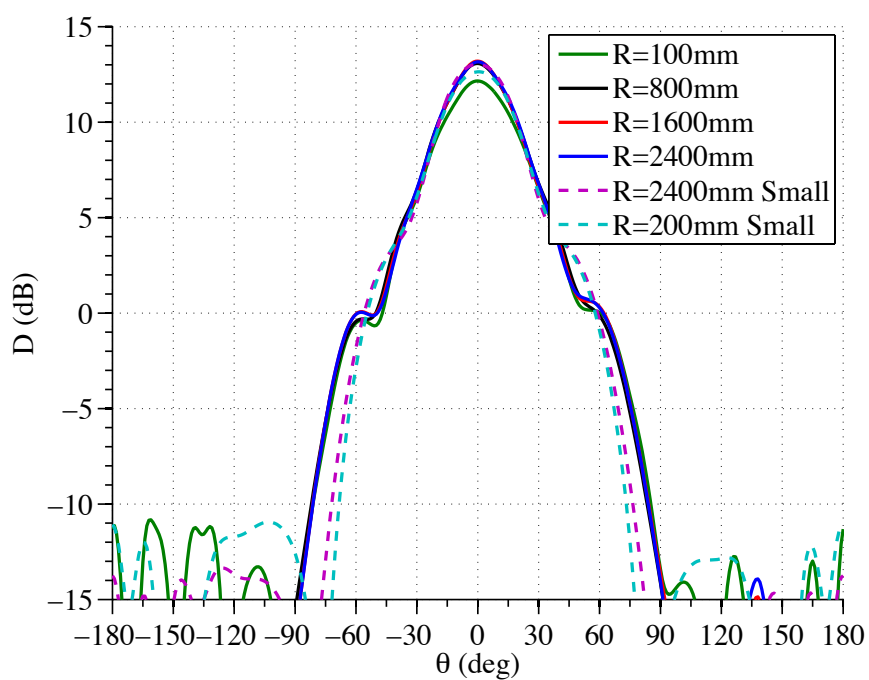


(a) Plano E

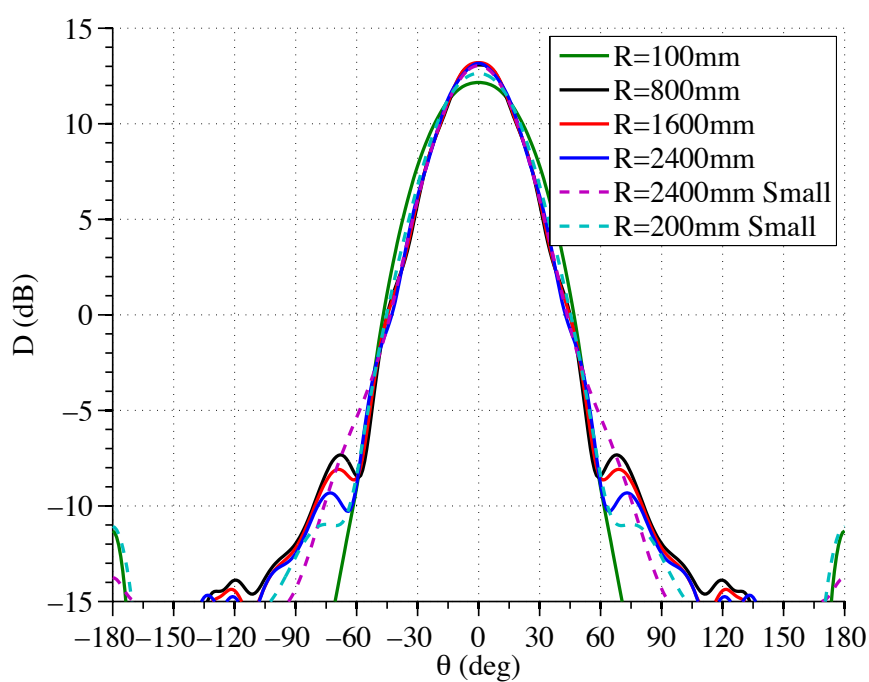


(b) Plano H

Figuras 4.7: Diagrama de radiación en ambos planos de la antena doblada por plano E



(a) Plano E



(b) Plano H

Figuras 4.8: Diagrama de radiación en ambos planos de la antena doblada por plano H

Los diagramas de radiación son bastante estables para todos los casos, sólo las curvaturas más extremas degradan los diagramas de radiación. El comportamiento es similar para los dos tamaños de la antena propuestos y para la flexión a lo largo de los dos planos estudiados.

La solución estudiada tiene buen rendimiento, por lo que no tendría ningún problema en teoría el diseño final si sufre alguna curvatura al ser integrada en la ropa en zonas como los hombros o los brazos.

Pero a la hora de llevar el diseño a la práctica, la distancia de $\lambda/2$ para esta frecuencia (aproximadamente 23.4mm) entre la antena de parche y el sustrato es demasiado grande para la frecuencia que se están estudiando en este trabajo, no permitiendo un perfil bajo, que es una de las necesidades de las antenas que estamos tratando. Una posible solución es la de reemplazar el sustrato por unas tiras metálicas FSS (Frequency Selective Surface) equivalentes a una distancia distinta. Estas tiras metálicas FSS pueden ser construidas usando material textil metálico y ser totalmente planas.

[\[REF.8\]](#)

Capítulo 5. Diseño antena final

En los diseños anteriores de antenas Fabry-Perot se ha estado usando un sustrato y un superestrato separados entre sí por una capa de vacío, cuya permitividad eléctrica relativa es $\epsilon_r=1$. Todas estas simulaciones son válidas, pero a la hora de realizar el prototipo diseñado, al usar una permitividad tan baja, el espacio entre ambos materiales será demasiado grande (varios centímetros), lo que dificultará la integración en la ropa. Por ello, se pretende construir una antena con tres materiales distintos, y que nos permita reducir esta distancia:

- En primer lugar tenemos un sustrato formado por un material textil, cuya permitividad relativa es $\epsilon_r=1.22$. Las láminas de dicho material que tenemos en el laboratorio tienen un espesor de 3mm, y las simulaciones previas con antenas de parche y Fabry-Perot han sido válidas usando este sustrato.
- Para el superestrato necesitaríamos un material que tenga permitividad eléctrica relativa de $\epsilon_r=10$. Este es el caso más especial, ya que a la hora de construir la antena no se usará una capa única de material, ya que esto haría una antena demasiado aparatosa, sino que se hará en un futuro la equivalencia FSS (superficie selectiva en frecuencia) y se usarán tiras metálicas textiles dispuestas de tal forma que tengan el mismo comportamiento que el superestrato simulado, pero ocupando un tamaño menor.
- Entre ambas capas usaremos el caucho del cual hemos medido la permitividad eléctrica relativa y hemos obtenido un valor de $\epsilon_r=5.85$ en la frecuencia de trabajo. Este caucho deberá tener un grosor específico para que el diseño sea lo más directivo posible, dicho espesor se calcula a continuación ($\lambda_{caucho}/2$). Usando un material con una permitividad mayor entre ambas capas se busca que el grosor de la antena sea menor.

Nuestra intención es construir una antena como se ha mencionado anteriormente y que funcione a la frecuencia ISM de 5.8GHz, ofreciendo una directividad alta.

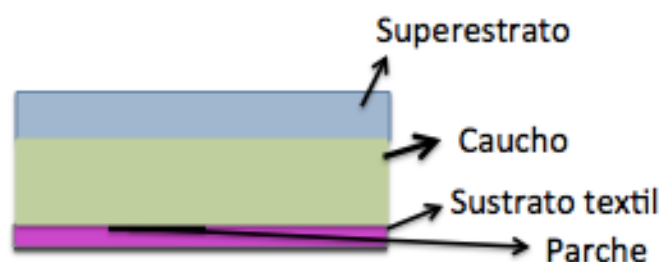


Figura 5.1: Configuración para el diseño final

En primer lugar, se adjuntan los cálculos iniciales para saber cómo construir la antena de forma que funcione como queremos.

Necesitamos que la antena funcione a la frecuencia ISM de 5,8 GHz, por lo tanto el valor de lambda en la vacío será el siguiente:

$$\lambda_o = \frac{c}{f} = 51.7mm \quad (5.1)$$

Para saber la distancia que ha de haber entre el sustrato y el superestrato, necesitamos calcular la lambda correspondiente al material que va a ocupar dicho lugar, y para ello debemos conocer la permitividad relativa del material (5.85). Además, esta distancia (d_{caucho}) debe ser $\lambda_{material}/2$.

$$\lambda_{caucho} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = 21.39mm \quad (5.2)$$

$$d_{caucho} = \frac{\lambda_{caucho}}{2} = 10.69mm \quad (5.3)$$

Con este d_{caucho} nos referimos a la distancia que debe haber entre la parte inferior del sustrato y esta misma parte del superestrato, para que la antena tenga el comportamiento esperado. Por ello, a la hora de realizar el diseño en el simulador, hay que restarle la altura que tiene el sustrato al espesor de la capa de caucho si queremos que su diagrama de radiación sea directivo apuntado a 0°. Este procedimiento se ha tenido que llevar a cabo en todos los diseños Fabry-Perot estudiados.

$$espesor_{caucho} = d_{caucho} - h_{sustrato} = 7.69mm \quad (5.4)$$

Como se mostrado con las ecuaciones anteriores, el espesor de la capa de caucho que debemos incluir en la antena debe ser de 7.69mm.

Ya teniendo decididas las medidas del caucho y del sustrato que se va a usar, falta por definir el espesor del superestrato. Dicho espesor se calcula dividiendo la lambda propia del material entre cuatro. Los detalles los podemos ver en las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{superestrato} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = 16.34mm \quad (5.5)$$

$$e_{superestrato} = \frac{\lambda_{superestrato}}{4} = 4.09mm \quad (5.6)$$

Tras estos cálculos, ya podemos saber el grosor total que tendrá la antena. Con la inclusión del caucho buscábamos reducir el grosor de la misma, y la antena resultante tendrá una altura total de:

$$h_{total} = h_{sustrato} + e_{espesorcaucho} + e_{superestrato} = 14.78mm \quad (5.7)$$

Que comparándolo con la altura de la antena diseñada en el capítulo 3 es mucho menor. Usando el caucho hemos conseguido diseñar una antena con menos de la mitad de grosor que en los casos anteriores, que era el objetivo principal. Con este grosor, la antena se podría integrar perfectamente en una prenda textil tipo cazadora.

El parche inicial del que parten las simulaciones es el obtenido en el diseño Fabry-Perot de permitividad relativo igual a 10, detallado en el capítulo anterior. Estas medidas iniciales son: $L=20.1mm$ y $p=5.23mm$.

También tendremos en cuenta que el lado de la antena de parche se suele aproximar usando la siguiente fórmula:

$$L = \frac{\lambda_o}{2\sqrt{\epsilon_r}} = 23.4mm \quad (5.8)$$

Siendo ϵ_r la permitividad del sustrato sobre el que se pondrá el parche, que en este caso es material textil, con $\epsilon_r = 1.22$. Tendremos en cuenta este lado en nuestros barridos posteriores.

Vamos a estudiar el comportamiento que tiene este diseño. En primer lugar queremos ver qué valor del lado del parche nos proporciona una adaptación a la frecuencia de operación deseada, para ello realizamos un barrido del lado usando como posición del puerto $p=5mm$. Se usa esta posición del puerto para asegurarnos que todas las simulaciones contendrán al parche.

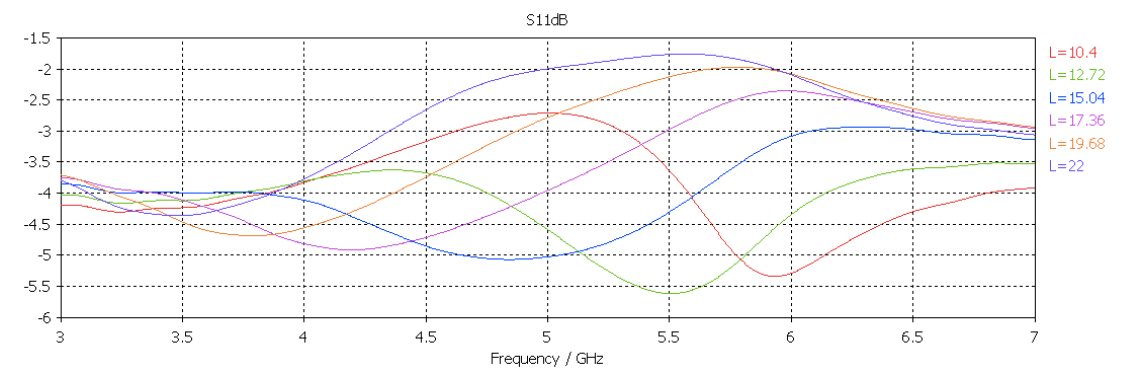


Figura 5.2: Barrido del lado del diseño final, usando sustrato textil, caucho y un superestrato con permitividad alta ($\epsilon_r = 10$)

En esta figura ya podemos observar que la adaptación se encuentra entre los dos valores más pequeños de esta simulación: entre 10.4 y 12.7, pero quedando bastante más cerca del lado más pequeño. Por ello se hará una última simulación para calcular qué lado del parche nos proporciona una antena funcionando a nuestra frecuencia de operación.

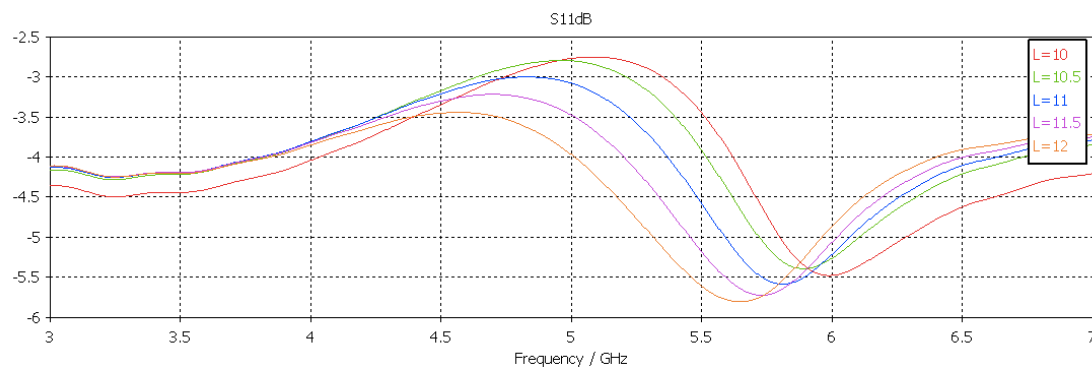


Figura 5.3: Segundo barrido del lado para determinar el lado del parche que se pondrá sobre el sustrato textil

Dando como resultado que el lado del parche que estábamos buscando es $L=11$ mm.

Una vez que ya sabemos el lado, nos interesa conocer qué posición del puerto nos puede ofrecer un mayor ancho de banda. Para ello mantendremos fijo el valor del lado y haremos un barrido de la posición del puerto. Se obtienen los siguientes resultados.

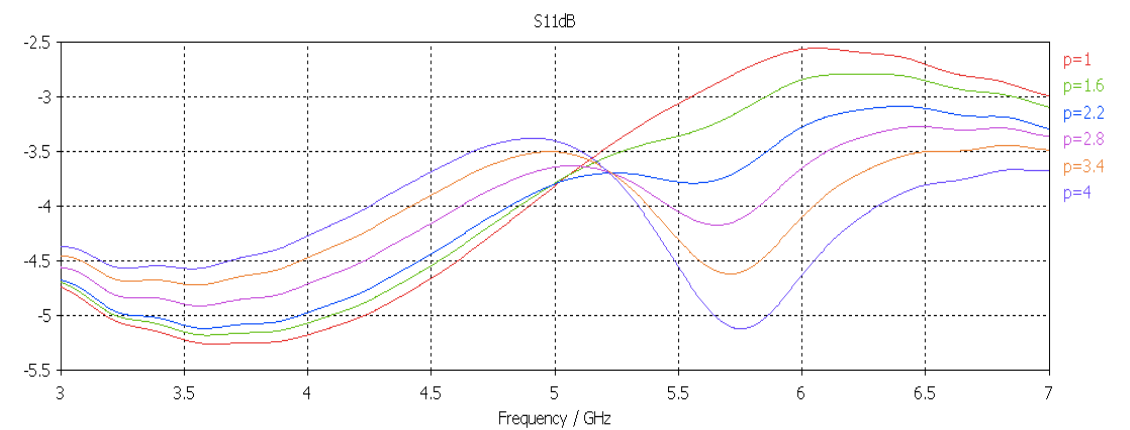


Figura 5.4: Barrido de la posición del puerto, usando parche cuadrado de $L=11\text{mm}$

Como se ve en la figura, ninguno de los resultados nos ofrece un valor de ancho de banda aceptable. Pero son resultados que podríamos tolerar, ya que se produce algo de adaptación y llega energía a la antena para producirse la radiación, siempre y cuando los diagramas de radiación sean suficientemente directivos. Nos quedamos con el valor del puerto que nos ofrece una mayor adaptación, que es $p=4\text{mm}$. Por lo tanto, las medidas del diseño de la antena final son las siguientes:

Lado dieléctrico (PM)	$8 \lambda_0$
λ_0	51.7mm
ϵ_r sustrato	1.22
ϵ_r caucho	5.85
ϵ_r superestrato	10
Altura sustrato (h)	3mm
Espesor caucho	7.69mm
Espesor superestrato	4.09mm
Lado parche	11mm
Posición puerto (p)	4mm

Dichas medidas ofrecen los siguientes diagramas de radiación.

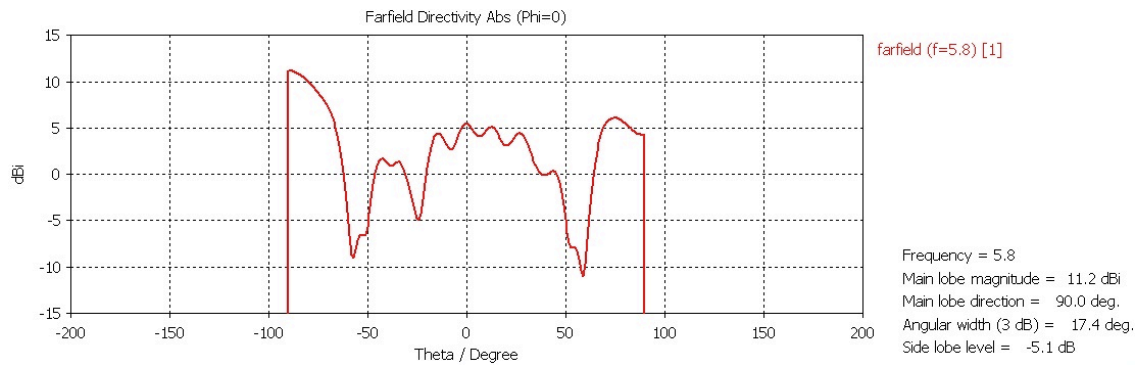


Figura 5.5: Diagrama de radiación en $\phi=0$ para el diseño con material textil, caucho y superestrato de permitividad alta ($\epsilon_r = 10$)



Figura 5.6: Diagrama de radiación en $\phi=90$ para el diseño con material textil, caucho y superestrato de permitividad alta ($\epsilon_r = 10$)

Como se puede observar los diagramas obtenidos no son nada directivos en $\theta = 0^\circ$, que es el objetivo que se perseguía utilizando las medidas de una antena que no ofrecía una buena adaptación.

La explicación a que se haya obtenido una adaptación, aunque haya sido muy pobre, con un lado mucho menor que el que resultaba de teoría (23.4mm) es que el caucho pegado al parche de alguna manera aumenta la permitividad efectiva del mismo.

Los resultados en los diagramas de radiación se explican por la permitividad tan baja que tiene el sustrato textil en comparación con los demás componentes de la antena, lo que hace imposible realizar la antena directiva. Al emitir desde el parche situado en una superficie con una permitividad baja $\epsilon_r = 1.22$ hacia, no solo una, sino dos superficies con permitividad mucho mayor (en el caso del caucho $\epsilon_r = 5.85$ y del superestrato $\epsilon_r = 10$) y un espesor más acentuado la directividad ganada en diseños anteriores se pierde al confinarse la mayoría de las ondas radiadas por el parche en la estructura, resultando unos diagramas de radiación muy poco directivos.

Para subsanar este problema y obtener una antena como la pensada inicialmente radiando en la frecuencia deseada, se decide sustituir el sustrato textil del parche por uno de permitividad más alta, para ganar directividad. Se sustituye el material textil cuya altura era de 3mm por una placa de caucho del mismo grosor (por lo que la altura total de la antena no se verá afectada), pero con una permitividad $\epsilon_r = 5.85$ a la frecuencia de operación. Este nuevo esquema se presenta en la siguiente figura.

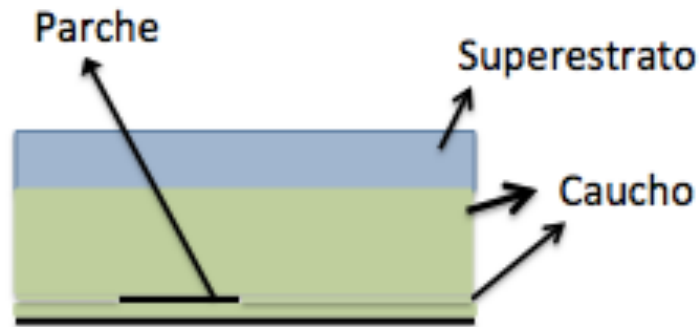


Figura 5.7: Diseño final usando únicamente caucho y superestrato $\epsilon_r = 10$

Como queremos trabajar en el modo fundamental, vamos a aproximar el lado del parche que tendrá nuestra antena.

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} = 10.7mm \quad (5.9)$$

Se realizan distintos barridos tanto del lado del parche como de la posición del puerto, para optimizar los resultados obtenidos.

La mayoría de los parámetros son heredados del diseño anterior, ya que solo hemos cambiado el material que compone el sustrato. Solo sufrirá cambios el parche de la antena, quedando ésta modelada con los siguiente parámetros:

Lado dieléctrico (PM)	$8 \lambda_0$
λ_0	51.7mm
ϵ_r sustrato	5.85
ϵ_r caucho	5.85
ϵ_r superestrato	10
Altura sustrato (h)	3mm

Espesor caucho	7.69mm
Espesor superestrato	4.09mm
Lado parche	7mm
Posición puerto (p)	3.3mm

Y con este diseño se obtienen las siguientes prestaciones:

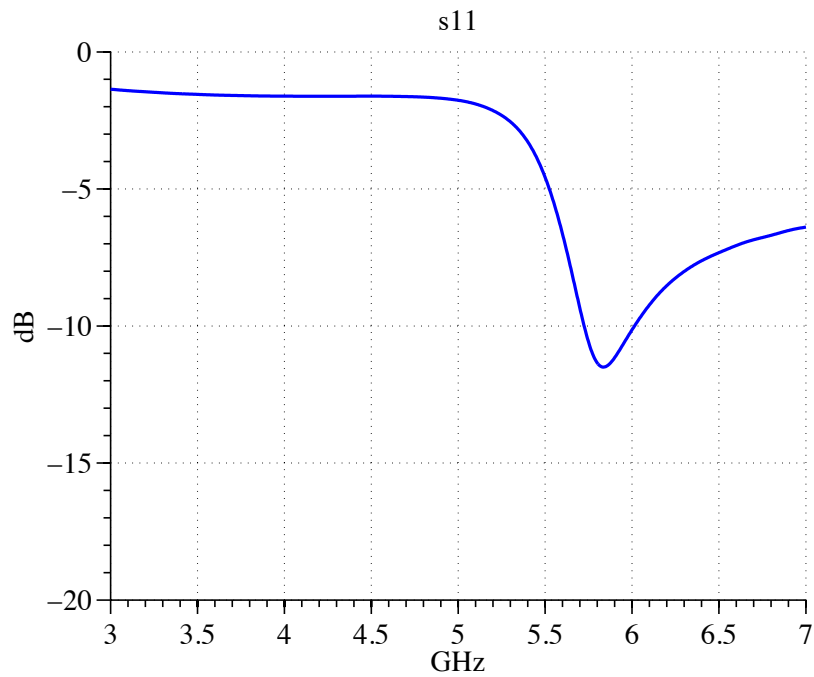


Figura 5.8: Coeficiente de reflexión del diseño formado por caucho y el superestrato de $\epsilon_r = 10$

Se observa que se consigue un ancho de banda algo limitado, pero bastante más amplio que para el diseño anteriormente estudiado. Nos asegura que la antena esté alimentada de forma correcta y sea capaz de radiar.

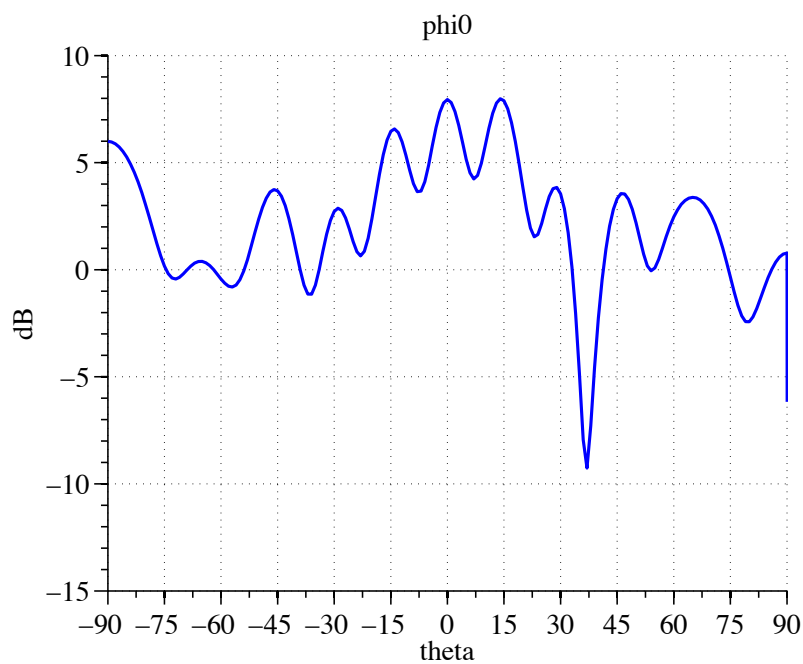


Figura 5.9: Diagrama de radiación en $\phi=0$ del diseño formado por caucho y el sustrato de $\epsilon_r = 10$

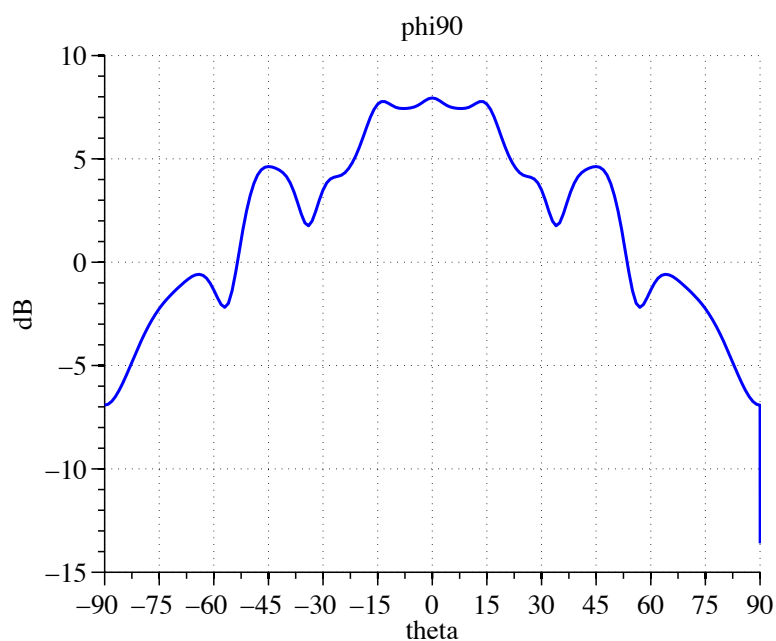


Figura 5.10: Diagrama de radiación en $\phi=90$ del diseño formado por caucho y el sustrato de $\epsilon_r = 10$

En cuanto a los diagramas de radiación en ambos planos, trabajando en este modo son más directivos como era de esperar, pero no nos ofrecen una directividad suficiente, ya que apenas superan la de un parche simple sin estructura Fabry-Perot.

Capítulo 6. Resultados experimentales

Debido a las limitaciones de tamaño que nos hemos encontrado al realizar las simulaciones del diseño final, y a los malos resultados obtenidos en las simulaciones anteriores, vamos a proceder a la construcción de un prototipo que tenga las mismas características del prototipo diseñado en el capítulo 4, pero que funcione a una frecuencia mayor. Esto nos repercutirá en el tamaño total tanto de la antena como del parche, que serán más pequeños, y nos permitirá disminuir la altura total de la antena. Además, para este diseño usaremos como sustrato y material entre sustrato y superestrato el material textil que disponemos en el laboratorio, y como superestrato el caucho que también tenemos en el laboratorio como hicimos en el capítulo 4, quedando una composición (de abajo a arriba) del siguiente modo: sustrato textil, material textil y superestrato de caucho.

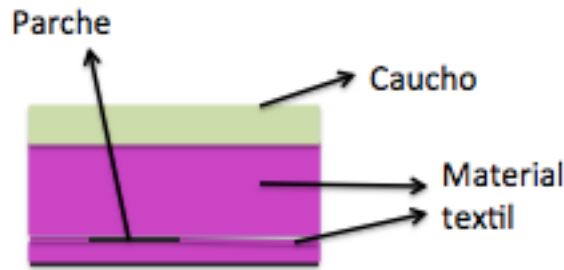


Figura 6.1: Configuración del diseño experimental medido en el laboratorio

En primer lugar definimos la nueva frecuencia de trabajo que vendrá definida por la disponibilidad de materiales en el laboratorio y sus espesores, que será la banda de 10GHz. Calculamos la longitud de onda del vacío para esta frecuencia:

$$\lambda_o = \frac{c}{f} = 30mm \quad (6.1)$$

Para que la antena trabaje en el modo fundamental, aproximaremos la medida del lado del parche con la siguiente ecuación (siendo $\epsilon_r = 1.22$, la permitividad del sustrato):

$$L = \frac{\lambda_o}{2\sqrt{\epsilon_r}} = 13.58mm \quad (6.2)$$

Para que este diseño tenga las mismas características de radiación que los anteriores, habrá que cumplir los siguientes requisitos:

$$\lambda_{caucho} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = 12.4mm \quad (6.3)$$

$$e_{caucho} = \frac{\lambda_{caucho}}{4} = 3.1mm \quad (6.4)$$

En la simulaciones este espesor se ha cambiado por 3mm, ya que es el espesor de las láminas de caucho que disponemos para la construcción de la antena.

Vamos a reducir el espesor del sustrato a la mitad de los casos anteriores, es decir, la altura del sustrato se quedará en 1.5mm.

Ahora, vamos a calcular la distancia a la que hay que poner el sustrato del superestrato para que la antena sea lo más directiva posible:

$$\lambda_{textil} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} = 27.16mm \quad (6.5)$$

Para lograr la máxima directividad, la parte de abajo del sustrato y la parte de abajo del superestrato deben estar a una distancia $\lambda_{material}/2$, y en este caso el material que hay entre ellos es de naturaleza textil.

$$d_{textil} = \frac{\lambda_{textil}}{2} = 13.58mm \quad (6.6)$$

$$espesortextil = d_{textil} - h_{sustrato} = 12.08mm \quad (6.7)$$

Donde *espesortextil* es el ancho de material textil que habría que poner entre sustrato y superestrato.

Lado dieléctrico (PM)	$8 \lambda_o$
λ_o	30mm
ϵ_r sustrato	1.22
ϵ_r superestrato	5.85 (caucho)
Altura sustrato (h)	1.5mm
Espesor textil	12.08mm
Espesor superestrato	3mm
Lado parche	11.8mm
Posición puerto (p)	5.5mm

Obtenemos los siguientes resultados:

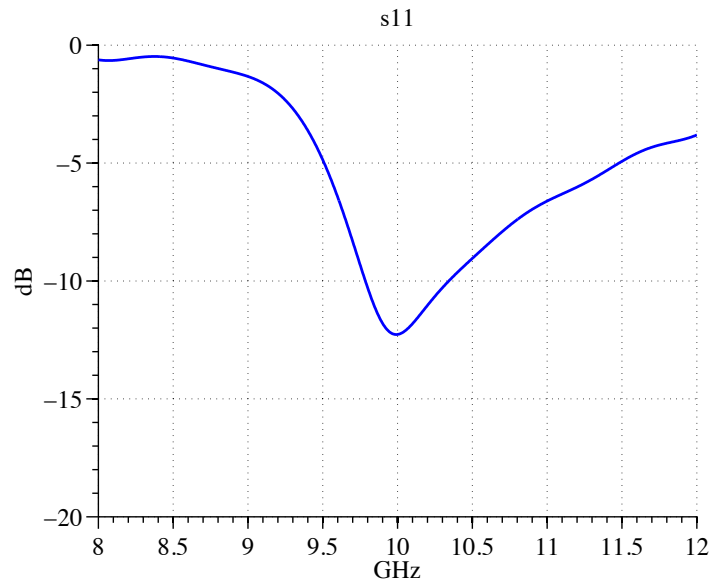


Figura 6.2: Coeficiente de reflexión del diseño experimental, en el que se usa material textil y caucho

Como se observa se consigue una adaptación aceptable a 10GHz, obteniendo un ancho de banda aproximado del 5% de la banda. Para calcular este porcentaje basta con conocer los puntos de corte de la curva con -10dB, que en este caso son aproximadamente en 9.75 y 10.25 GHz, lo que hace resultante una banda de 0.5 GHz. Para calcular el tanto por ciento basta con dividir entre ancho de banda por la frecuencia central de operación, y obtendremos un 5% de banda disponible.

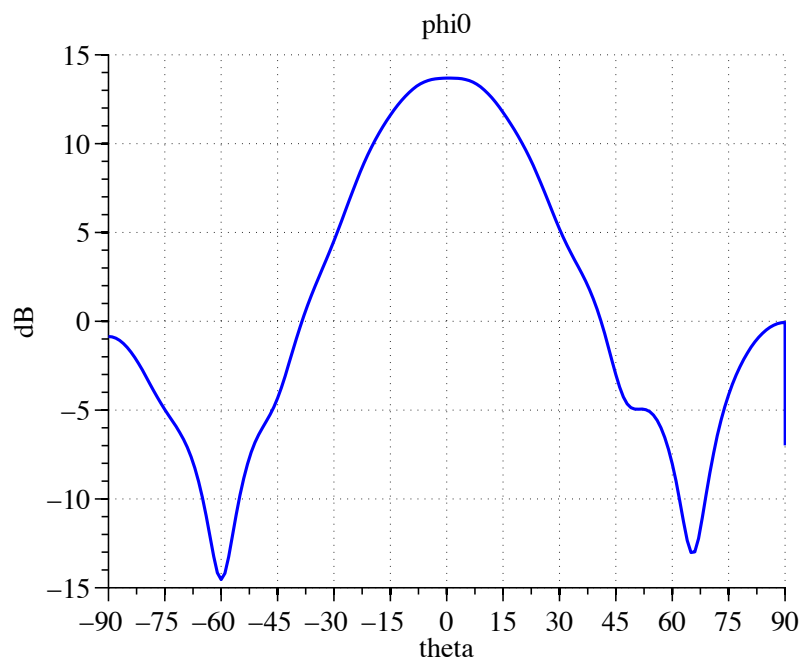


Figura 6.3: Diagrama de radiación en $\phi=0$ del diseño experimental

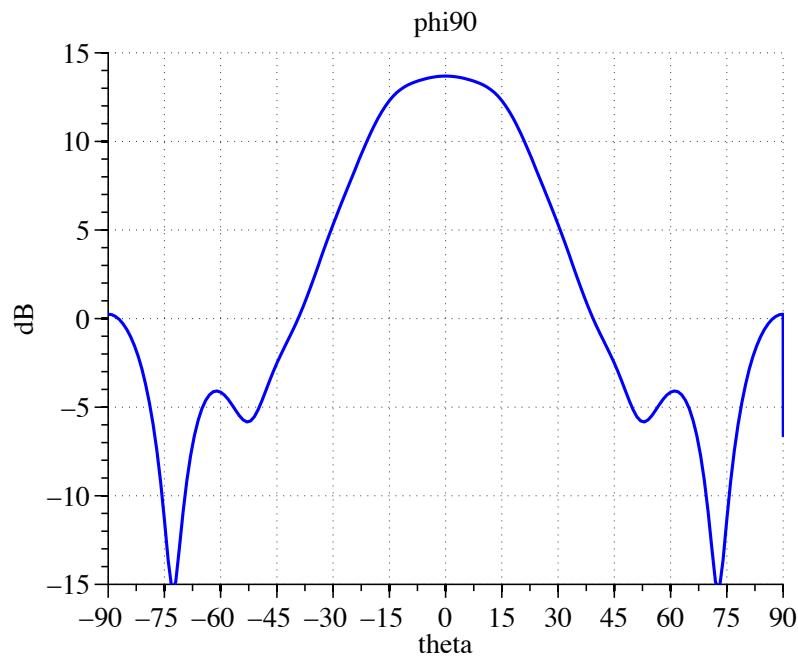


Figura 6.4: Diagrama de radiación en $\phi=90$ del diseño experimental

En los diagramas de radiación podemos observar la gran directividad que la antena tiene en ambos planos.

Viendo la adaptación y los diagramas de forma conjunta, podemos decir que es un diseño bastante bueno, que cumple los objetivos iniciales del trabajo, aunque trabajando en una banda de frecuencia diferente por motivos de tamaño y de disponibilidad de materiales en el laboratorio.

El grosor total de la antena es el siguiente:

$$\text{espesor total} = h_{\text{sustrato}} + \text{espesor textil} + e_{\text{caucho}} = 16.58\text{mm} \quad (6.8)$$

Que es un grosor muy adaptable a las aplicaciones que se buscan en el trabajo. Hemos ganado un poco de espesor respecto al diseño del capítulo anterior, pero en este caso hemos usado material textil (cuya permitividad relativa es mucho más baja que la del caucho) para cubrir el espacio entre el sustrato y el superestrato, que ofrece mejores prestaciones. Esta es la principal razón por la que este diseño trabaja a 10 GHz, si quisiéramos que trabajase en la banda ISM de 5.8 GHz la antena resultante sería excesivamente gruesa (casi el doble).

6.1 Montaje del prototipo y medidas en el laboratorio

Se procede a la realización de la antena con los materiales textiles, tela metálica y el caucho. Para ello contamos con la limitación de las placas textiles, que tienen un lado ya recortado a 22.5cm de fábrica. Por ello, como queremos una antena cuadrada, las dimensiones totales de la antena serán de 22,5cm x 22,5cm, en lugar de los 24cm x 24cm que se consideraba en un principio. Esto no debería afectar demasiado a los resultados teóricos, ya que en los bordes de la antena apenas debería quedar campo.

En primer lugar procedemos a construir la antena de parche, para ello cortamos el plano de masa a la misma medida dicha anteriormente (22,5cm x 22,5 cm), y hacemos lo mismo con una lámina textil. Colocamos en el centro un parche cuadrado del mismo material que el plano de masa (tela metálica), cuyo lado es $L=11.8\text{mm}$, y le marcamos la posición del puerto a 5,5mm respecto del centro. El puerto deberá atravesar al plano de masa y el sustrato, y tener conexión física con el parche, para la correcta alimentación de la antena.

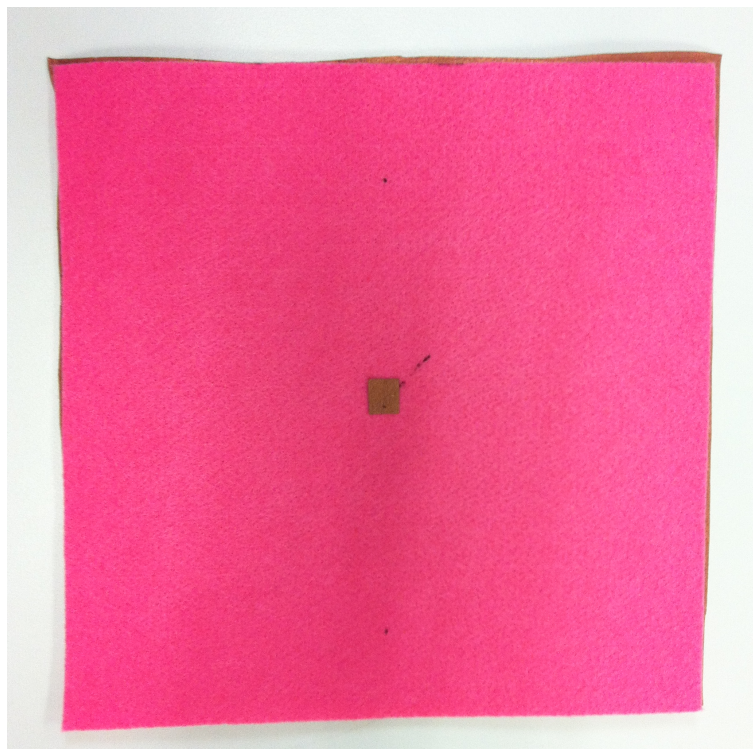


Figura 6.5: Antena de parche que será la base del diseño final de antena Fabry-Perot, formada por sustrato textil y plano de masa y parche en tela metálica



Figura 6.6: Parche ya recortado y puerto para la alimentación de la antena

Tras realizar unas pequeñas comprobaciones procedemos a poner las planchas textiles sobre la antena de parche, y a continuación el caucho que actuará como sustrato. El diseño final tiene un aspecto parecido a la de la siguiente imagen:



Figura 6.7: Medición del coeficiente de reflexión del diseño experimental en el laboratorio de radiofrecuencia

Como se ha demostrado anteriormente, el grosor total del diseño es de 16.58mm. Después del montaje de la antena en el laboratorio, se usa un analizador vectorial de redes para realizar la medición del coeficiente de reflexión, s_{11} , obteniendo los siguientes resultados:

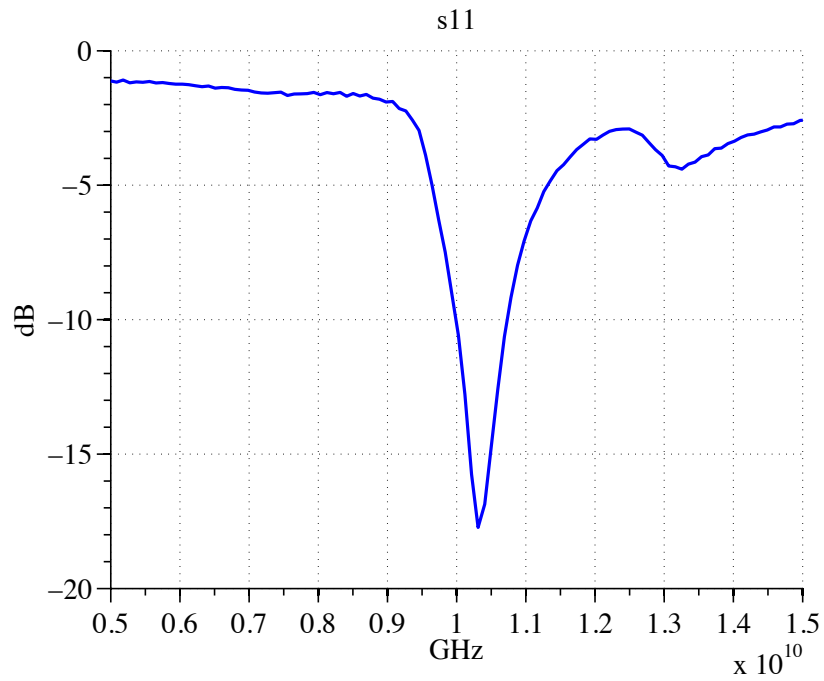


Figura 6.8: Resultado del coeficiente de reflexión medido para el diseño experimental

Este s_{11} resultante demuestra que el diseño está funcionando muy cerca de la banda de los 10 GHz, que es lo que se perseguía en este capítulo.

No se adjuntan las medidas de los diagramas de radiación en el laboratorio, por imposibilidad de realizar dicha prueba.

Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras

7.1 Conclusiones

En este trabajo fin de grado se ha evaluado la posibilidad de realizar una antena Fabry-Perot con materiales textiles y caucho común, que puede ser especialmente útil para las comunicaciones entre flotas o similares. Esta antena es sencilla y a la vez consigue una elevada directividad.

En primer lugar se ha realizado un estudio de las distintas topologías de antenas de parche, para ver cuál de estas nos convenía utilizar como alimentador a la hora de diseñar la antena final. Se han medido tanto el ancho de banda y la adaptación, como los diagramas de radiación resultantes en cada una de ellas. Se observa que no tienen una gran directividad, es decir, sus diagramas de radiación poseen lóbulos muy anchos.

Se ha comprobado que para diseñar las antenas de parche basta con variar dos parámetros, ya que el resto son propiedades del material (como puede ser la permitividad eléctrica relativa): el lado del parche y la posición del puerto. La relación entre el lado del parche y la frecuencia de adaptación de la antena, demostrada en el trabajo, es inversamente proporcional. Es decir, cuánto más grande sea el lado del parche de la antena a diseñar, más pequeña será su frecuencia de operación. La posición del puerto nos afecta a la adaptación de la antena, y al ancho de banda que puede ofrecer ésta.

$$f = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon r}} \quad (7.1)$$

A continuación, se han ido adaptando este tipo de antenas a un sustrato textil para estudiar su comportamiento, y realizando distintos diseños con diferentes alturas de sustrato.

Tras analizar el comportamiento del sustrato textil, se presentan los estudios de los diseños Fabry-Perot. Para el diseño de este tipo de antenas hay que tener en cuenta algunas consideraciones:

- Para que sea un diseño lo más directivo posible, la distancia entre la parte más baja del sustrato y la parte más baja del superestrato ha de ser $\lambda/2$, siendo λ la correspondiente al material que hay entre el sustrato y el superestrato.

- El espesor del sustrato depende de la permitividad relativa del mismo. A mayor permitividad, sustrato más delgado como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$espesor_{sustrato} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7.2)$$

Se ha comprobado a lo largo del trabajo que ajustando bien estos parámetros podemos ganar mucha directividad con respecto a los diseños de antenas de parche.

Se ha demostrado que podemos obtener resultados muy diferentes cambiando la permitividad del sustrato, así como su espesor. Mientras que usando un sustrato con permitividades pequeñas, obteníamos diseños de antenas con un buen ancho de banda, pero muy poco directiva, al ir aumentando la permitividad del material, perdíamos ancho de banda pero vamos ganando directividad.

También hemos estudiado cómo afecta a una antena tipo Fabry-Perot el aumento o disminución de sus dimensiones totales. Cuanto más grande sea el tamaño de la antena, menos ondas interferentes se producen en la estructura y mayor superficie del sustrato iluminada, lo que provoca una antena con una mayor directividad. Lo contrario pasa cuando el tamaño de la misma es pequeño, ya que las ondas se reflejan al llegar a la discontinuidad, y al tener suficiente energía aún (por haber recorrido poca distancia), crean interferencias, desadaptaciones y un diagrama de radiación menos directivo. En nuestro caso no se notó apenas la diferencia, por lo que se decidió seguir con el diseño inicial de $8\lambda_0 \times 8\lambda_0$.

Posteriormente, se estudió el efecto que podría tener una posible curvatura en nuestra antena. Se realizó este estudio ya que nuestro diseño está pensado para integrarse en la ropa, en zonas como pueden ser los brazos o los hombros, que poseen una ligera curvatura. Se ha demostrado, para ambos planos, que no supone ningún problema para el correcto funcionamiento de las antenas.

Se ha estudiado el comportamiento de antenas Fabry-Perot fabricadas con material textil, caucho y un sustrato con una permitividad relativa alta, para intentar construir una antena con alta directividad, así como este mismo tipo de antenas usando solamente caucho y sustrato. Para estos diseños no se han obtenido resultados apropiados, y podrían ser un caso de estudio en un trabajo futuro, sobre todo el segundo caso.

Por último, se decidió realizar una antena utilizando solamente material textil y caucho, que aunque no nos pueden ofrecer tanta directividad como los otros diseños

inicialmente pensados, nos dan resultados muy buenos, y con unas dimensiones óptimas para su construcción. Los resultados obtenidos se verificaron experimentalmente en el laboratorio.

Estos resultados han sido enviados y aceptados para su presentación a una conferencia internacional, en concreto a IEEE Antennas and Propagation International Symposium 2014. Convened Session on “Textile antennas or Implantable antennas”.

7.2 Líneas futuras

Como líneas futuras para la continuación de este TFG se propone:

- Estudiar la realización de un diseño similar usando materiales similares al caucho con permitividades mayores, que puedan proporcionar una antena más directiva.
- Reemplazar el sustrato por tiras metálicas FSS: A la hora de llevar el diseño a la práctica, trabajando a las frecuencias que proponíamos al principio, el área de $\lambda/2$ entre el sustrato y el superestrato es demasiado grande. Se propone reemplazar el superestrato por una tiras metálicas equivalentes FSS, que se colocarán a una distancia distinta y pueden ser construidas por material textil metálico, quedando completamente planas.
- Diseñar una antena alimentada por un parche con un sustrato más grueso y una topología tipo gap, es decir, un parche metálico cuadrado normal y a una distancia determinada otro pequeño parche para contener al puerto. De este modo podríamos obtener más ancho de banda de operación que en los diseños presentados en este trabajo.
- Medir los diagramas de radiación del prototipo fabricado y estudiarlos para distintas curvaturas y otras deformaciones de la superficie.

Capítulo 8. Presupuesto

Tras la realización de la memoria, se pretenden justificar los costes globales de la realización de este trabajo fin de grado.

El coste del presupuesto está basado tanto en las horas empleadas para la realización del mismo como en los materiales empleados para ello.

En primer lugar se hará una estimación de las horas invertidas en cada tarea:

TAREA	HORAS
Planificación inicial del proyecto y documentación	20
Aprendizaje del manejo del CST Microwave Studio	30
Estudio y diseño antenas de parche	25
Diseño antenas Fabry-Perot y curvatura	80
Diseño final	100
Diseño experimental	25
Realización de la memoria	180
Total	460

A continuación, se cuantificarán y valorarán las horas invertidas en el proyecto tanto por parte del alumno como por parte de la tutora.

El precio estimado del alumno, al aún no poseer el título de ingeniero, sería de unos 4.5€/hora, que es aproximadamente el sueldo que puede tener un becario, mientras que en el caso de la tutora se hará una estimación de unos 40€/hora.

Coste de horas empleadas por el alumno	$460h \times 4.5€/h = 2070€$
Coste de horas empleadas por tutora	$40h \times 40€/h = 1600€$

Los materiales han sido todos de bajo coste, estimando un gasto de unos 30€ para la construcción de la antena final.

Los aparatos de medidas usados han sido cedidos por el laboratorio de radiofrecuencia de la Universidad Carlos III, sin ningún gasto extra.

Horas empleadas por alumno y tutora	3670€
Materiales	100€
Coste total del TFG	3770€

Referencias

1. Kaur, Rajni Navdeep. «Design and Simulation of Microstrip Patch Antenna for On-Body Communication using Different Feeding Techniques.» *Conf. on Advances in Electronics, Electrical and Computer Engineering*, 2013: 296-300.
2. Zhu, Shaozhen, y Richard Langley. «Dual-Band Wearable Textile Antenna on an EBG Substrate.» *IEEE transactions on Antennas and propagation*, April 2009: 926-935.
3. Hao, Yang. «Antennas and Propagation for Body Centric Wireless Communications in Healthcare.» School of Electronic Engineering and Computer Science. London: University of London, 2011.
4. Klemm, Maciej, y Gerhard Tröster. «Textile UWB antenna for on-body communications.» *IEEE ESA SP-626. Centre for communications research, electromagnetic group, University of Bristol*, 2006.
5. Balanis, C.A. *Antenna Theory. Analysis and Design*. Editado por Inc. 3rd Edition John Wiley & Sons. New Jersey: Wiley, 2005.
6. Guo, Xichen, David R. Jackson, Ji Chen, Filippo Capolino, y Donald R. Wilton. «Leaky-Wave Analysis of Fabry-Perot Resonant Cavity Antennas.» *International Symposium on Electromagnetic Theory*, 2013: 1091-1093.
7. Capolino, Filippo, y David R. Jackson. «Directive Fabry-Pérot Cavity Leaky-Wave Antennas: History, Design and Theory.» *IEEE APS Symp.*, 2012.
8. Vico-Martínez, A., D. Blanco, y E. Rajo-Iglesias. *Evaluation of the performance of wearable directive antennas based on Fabry-Perot type*. Aceptado para la conferencia del IEEE Antennas and Propagation International Symposium 2014. Convened Session on “Textile antennas or Implantable antennas”

Fuentes electrónicas

1. "ISM Band". URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band] (Consulta: 15/12/2013).
2. "Textile antennas". *Patria*. URL: [<http://www.patria.fi/EN/Products+and+services/Situational+Awareness/Textile+Antennas/index.html>] (Consulta: 27/12/2013).
3. Capítulo 3, "Antenas de tipo parche o microstrip". URL: [http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo3.pdf] (Consulta: 14/01/2014).

4. "Rectangular Microstrip Antennas". "Planar Inverted-F Antennas (PIFA). *Antenna Theory*. URL: [http://www.antenna-theory.com/antennas/main.php] (Consulta:18/01/2014).